

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Тексты лекций для студентов специальности
1-36 05 01 «Машины и оборудование лесного комплекса»

Минск 2010

УДК 630*36:62-192(075.8)

ББК 43.90я73

О-13

Рассмотрены и рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета.

Авторы:

В. Н. Лой, А. Р. Гороновский, С. П. Мохов, В. А. Коробкин

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент кафедры «Тракторы»
Белорусского национального технического университета

Ч. И. Жданович;

кандидат технических наук, доцент,
директор Республиканского компьютерного центра
машиностроительного профиля ОИМ НАН Беларуси,

С. В. Харитончик

Обеспечение надежности машин и оборудования : тексты
О-13 лекций для студентов специальности 1-36 05 01 «Машины и
оборудование лесного комплекса» / В. Н. Лой [и др.] – Минск :
БГТУ, 2010. – 80 с.

ISBN 978-985-530-043-5.

В издании даны основные положения науки о надежности машин и оборудования, причины потери их работоспособности. Приведены теоретические основы сущности надежности машин. Рассмотрены методики расчета и испытаний лесных машин и оборудования на надежность. Сформулированы основные мероприятия по обеспечению высоких показателей надежности лесных машин и оборудования.

УДК 630*36:62-192(075.8)

ББК 43.90я73

ISBN 978-985-530-043-5

© УО «Белорусский государственный
технологический университет», 2010

© Лой В. Н., Гороновский А. Р.,
Мохов С. П., Коробкин В. А., 2010

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время лесозаготовительные предприятия Республики Беларусь оснащаются современными многооперационными гидрофицированными лесными машинами с высоким техническим уровнем, который в значительной степени определяется надежностью. Оценка надежности изделия – вопрос, которому должно уделяться первостепенное внимание с момента производства до непосредственного использования любого технического устройства, в том числе и лесозаготовительного оборудования. Опыт эксплуатации лесозаготовительных машин показывает, что эффективность их использования зависит в первую очередь от надежности. Надежность машин связана с повышением уровня автоматизации, уменьшением затрат на ремонт, снижением убытков от простоев, обеспечением безопасных условий труда оператора. Эти вопросы можно решить только с помощью инженерно-технических работников, которые в совершенстве владеют теоретическими и практическими вопросами надежности машин. Поэтому изучение научных основ надежности стало неотъемлемой частью учебного процесса в технических ВУЗах.

Ряд основных положений науки о надежности базируется на теории прочности и износостойкости деталей и материалов. Однако необходимо отметить, что если инженерные расчеты прочности, в частности с использованием компьютерных технологий моделирования, в настоящее время не проблематичны, то расчет долговечности в теории надежности машин представляет некоторые трудности, особенно с учетом главного критерия – износостойкости. Из-за износа деталей и сопряжений в 80 случаях из 100 оборудование теряет свою работоспособность.

Наука о надежности в настоящее время выделилась в самостоятельную дисциплину, которая изучает закономерности изменения показателей работоспособности изделий с течением времени, а также физическую природу отказов и разрабатывает методы, обеспечивающие необходимую долговечность и безотказность машин. Таким образом обеспечивается научный прогноз поведения машин и разрабатывается теория принятия оптимальных решений для получения требуемого уровня надежности.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ПОЛОЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Теория надежности является комплексной дисциплиной и состоит из таких разделов, как математическая теория надежности, надежность по отдельным физическим критериям отказов, расчет и прогнозирование надежности, мероприятия по повышению надежности, контроль надежности (испытания, статистический контроль, организация наблюдений) и техническая диагностика, теория восстановления, экономика надежности.

Под надежностью понимается свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах все параметры, обеспечивающие требуемые функции в заданных условиях эксплуатации. Надежность как свойство изделия сохранять работоспособность в течение заданного промежутка времени рассматривается как для случая непрерывной работы изделия (безотказность), так и в случае необходимых перерывов для технического обслуживания и ремонта (долговечность).

Наука о долговечности анализирует процесс изменения показателей надежности с течением времени, причины возникновения отказов и разрабатывает рекомендации по восстановлению начальных параметров машин.

Во время эксплуатации машина подвергается воздействию внешней среды, влиянию процессов в ней самой, что ухудшает ее начальные характеристики. Эти процессы носят случайный характер, и поэтому для оценки надежности машин применяются методы теории вероятностей и математической статистики. Снижение показателей надежности машин приводит к большим затратам на ремонт, простоям.

Надежность рассматривается применительно к техническим системам и их элементам.

Техническая система – совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций.

Система состоит из элементов – простейших составных частей изделия (деталь, узел, агрегат).

Понятия элемента и системы трансформируются в зависимости от поставленной задачи. В этом смысле лесотехнологическое оборудование, автомобиль или трактор можно рассматривать как системы, состоящие из отдельных элементов (сборочных единиц). Сборочная единица также может рассматриваться как система, состоящая из деталей. При изучении надежности комплекса, например лесосечных

машин, отдельная машина (трелевочный трактор, челюстной погрузчик) является элементом системы. Изделия, т. е. системы и их элементы, бывают ремонтируемыми (восстанавливаемыми) и неремонтируемыми (невосстанавливаемыми).

Ремонтируемые изделия: тракторы, автомобили, технологическое оборудование, а также их составные части (рамы, редукторы, отдельные детали и т. д.).

Неремонтируемые изделия: системы и их элементы, не подлежащие ремонту и восстановлению (поршневые кольца, тормозные накладки, фрикционные накладки сцепления, сальники и т. д.). Простые элементы, изготавливаемые массово, часто не подлежат восстановлению.

В зависимости от технического состояния одни и те же изношенные изделия могут быть восстанавливаемыми или невосстанавливаемыми. Например, коленчатый вал с трещинами (не восстанавливается) и без трещин (восстанавливается).

Обобщенное понятие «продукция» включает понятия изделия и продукта.

Изделие – продукция промышленного производства, измеряемая в штуках, экземплярах. Это могут быть системы и их элементы (трактор, сборочные единицы и детали, технологическое оборудование – гидроманипулятор, коник и т. д.).

Продукт – результат производственного процесса (древесина), измеряемый в килограммах, кубических метрах.

При эксплуатации изделий расходуется их **ресурс**. Для продуктов используется термин «**потребление**», так как в процессе использования продукты расходуются (например, нефтепродукты).

Качество продукции – совокупность свойств, т. е. объективных особенностей, проявляющихся при создании продукции, ее эксплуатации или потреблении, которыми обусловлена ее пригодность удовлетворению определенных потребностей в соответствии с назначением.

Качество лесных машин и оборудования определяется совокупностью присущих им свойств, и, прежде всего, теми из них, которые имеют важное значение для их производства и эксплуатации. Технически прогрессивные и экономически обоснованные нормативные свойства нового технического объекта указываются в техническом задании на его проектирование. Выявляются же они в процессе производства, эксплуатации и ремонта и не остаются постоянными, как и качество самого технического объекта. Новые конструкции машин должны создаваться с учетом степени их прогрессивности, определяемой такими

показателями, как производительность, экономичность, конструктивность, технологичность, надежность, эргономичность. При этом должна обеспечиваться возможность совершенствования основных свойств машин путем их модернизации.

Создаваемое лесопромышленное оборудование должно обеспечивать рост производительности труда с учетом возможного улучшения технико-эксплуатационных показателей оборудования (прежде всего скоростных показателей и грузоподъемности), автоматизации рабочих процессов.

Производительность – объем продукции (работы), производимой в единицу времени данным оборудованием. Она зависит от конструктивных особенностей, технологической характеристики оборудования, производственной квалификации рабочих.

Окончательная оценка целесообразности применения нового оборудования должна производиться с учетом его **экономичности**.

Конструктивность лесной машины [1, 2] – это предельно возможная простота и целесообразность ее конструкции с учетом требований стандартизации узлов и деталей, прочности и надежности отдельных деталей, узлов и агрегатов.

Необходимо обеспечивать снижение трудоемкости изготовления деталей и сборки машин и оборудования, технологическую преемственность, т. е. **технологичность** конструкции.

Важное место отводится обеспечению **эстетичности** и **эргономичности** конструкции. Ее эстетичность определяется цельностью, соразмерностью, выразительностью формы изделия при полном соответствии функциям и назначению. Это создает благоприятные психологические условия работы обслуживающего персонала и способствует повышению производительности труда.

Согласно принципам инженерной психологии, конструкция машины должна рассматриваться в совокупности с антропометрическими показателями человека (оператора). Создание оптимального режима работы человека в системе «человек – машина» обеспечивается выполнением требований эргономичности машины. При этом должно соблюдаться удобство ее обслуживания и ремонта.

В обеспечении качества машин важное место отводится **стандартизации**. В ее задачи входит исключение нерационального многообразия видов и типоразмеров продукции. Стандартизация способствует упорядочению деятельности в определенной области, обеспечивает экономию при соблюдении условий эксплуатации и требований техники безопасности. Сущность ее состоит в организации производ-

ства стандартных узлов и деталей, которые являются массовыми, при снижении расхода материалов, трудоемкости изготовления и стоимости. Применение стандартизации удешевляет процесс создания машин и оборудования и сокращает их сроки и стоимость, при применении стандартных деталей и узлов отпадает необходимость в их конструировании и изготовлении. При специализированном производстве деталей и узлов упрощается ремонт, улучшается качество машин, повышается их надежность.

Агрегатирование – высшая ступень унификации. Применение этого метода заключается в создании машин путем использования стандартных или унифицированных деталей, узлов и агрегатов, обладающих геометрической и функциональной взаимозаменяемостью. Каждая новая машина создается путем компоновки и перекомпоновки из уже имеющихся агрегатов и узлов и представляет собой оригинальную конструкцию.

Используются два способа агрегатирования. Первый – на основе базовой машины путем присоединения к ней отдельных агрегатов. Он получил название *способа базового агрегата*. Второй заключается в присоединении друг к другу унифицированных агрегатов, называется *агрегатированием* и широко применяется в различных отраслях машиностроения. Агрегаты – автономные узлы – устанавливаются в разных комбинациях для создания механизмов, выполняющих различные функции. Для успешного применения этого метода необходим налаженный серийный выпуск таких узлов, как редукторы, коробки передач, дифференциальные механизмы и др.

Как агрегатирование, так и способ базового агрегата широко используются при создании машин и оборудования для лесной промышленности. Базовым агрегатом, как правило, служит серийное автомобильное или тракторное шасси. На шасси устанавливается технологическое оборудование различного назначения и конструкции: лебедки, манипуляторы, коники и т. п., а также узлы их привода и механизмы управления.

Применение агрегатирования сокращает сроки проектирования машин и оборудования, снижает себестоимость их изготовления, улучшает использование производственных мощностей. Оно ускоряет переход на новые модели машин при повышении их качества, надежности и долговечности.

Надежность – важнейшая составляющая качества. Наука об измерении качества продукции называется *квалиметрией*. Показатель качества продукции – количественная характеристика.

Различают единичный и комплексный показатели, т. е. показатели, относящиеся только к одному из свойств продукции и к нескольким свойствам соответственно. В качестве интегрального показателя, отражающего суммарный полезный эффект от эксплуатации или потребления продукции и суммарные затраты на ее создание и эксплуатацию, можно рассмотреть

$$K = \frac{H}{C},$$

где K – коэффициент суммарного полезного эффекта, полученный в результате эксплуатации изделия; H – экономический показатель, учитывающий эксплуатационные затраты при работе изделия; C – затраты на создание изделия.

Надежность характеризуется понятиями работоспособности, исправности (неисправности) и отказа.

Работоспособность – состояние изделия, при котором оно способно нормально выполнять заданные функции.

Исправность – состояние изделия, при котором оно удовлетворяет всем (не только основным, но и вспомогательным) требованиям. Исправное изделие обязательно работоспособно.

Неисправность – состояние изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований технической документации. Трелевочный трактор неисправен, если произошло снижение его производительности, превышающее допустимые пределы. Неисправное изделие может сохранять работоспособность. Например, задний мост трактора, имеющий изношенную шестерню: мост производит шум, но его эксплуатационные показатели не вышли за пределы, установленные техническими условиями. Различают неисправности, не приводящие к отказам и приводящие к отказам.

Отказ – событие, заключающееся в полной или частичной утрате работоспособности. Различают отказы функционирования и отказы параметрические.

Появление неисправности не всегда связано с возникновением отказа. Снижение мощности двигателя ниже установленного предела – отказ, т. е. автомобиль неисправен. Подтекание масла – неисправность, но не всегда отказ.

По происхождению отказы делятся на конструкционные, технологические и эксплуатационные.

Конструкционные обусловлены несовершенством конструкции изделия (конструкцией валочно-пакетирующей машины, например,

не предусмотрена защита агрегатов от ударных нагрузок при валке деревьев). При этом возможно повреждение агрегатов и, как следствие, отказ.

Технологические возникают в результате неправильного применения технологических процессов при изготовлении деталей (отсутствие, например, термообработки, нарушение последовательности сборки при изготовлении, неправильный выбор материалов и т. д.).

Эксплуатационные могут возникнуть как в нормальных условиях эксплуатации, так и при их нарушении (допущение перегрузок, неправильное включение рабочих органов машин и т. д.).

Причиной отказа может быть и нарушение правил технического обслуживания и ремонта. Отказы устраняют заменой деталей, их регулированием или очисткой (электроконтакты, гидросистема, топливopроводы).

По сложности отказы делят на простые и сложные.

Простые отказы (обрыв или ослабление болтов и т. п.) устраняются с помощью инструментов и принадлежностей (постоянным комплектом).

Сложные отказы возникают из-за появления предельных износов, трещин и т. д.

По характеру проявления различают постепенные и внезапные, устойчивые и самоустраняющиеся отказы. **Постепенные** отказы наступают в результате длительного, постепенного изменения параметров элементов. Им предшествуют стуки, нагрев и т. д. Наряду с механическим износом техника подвергается старению. *Износ и старение* – основные причины появления постепенных отказов. Их можно прогнозировать и предупреждать своевременной заменой деталей и узлов.

При **внезапных отказах** полная потеря работоспособности наступает неожиданно, мгновенно. Происходят они при нагрузках, превышающих прочность изделия.

Отказы могут быть **самоустраняющимися** (высыхание увлажнившихся тормозов), **устойчивыми** (увеличенный зазор в тормозах, который устраняется персоналом), **независимыми** (по любым причинам, но не вследствие другого отказа), **зависимыми** (когда причиной его является другой отказ, как, например, неисправность свечи зажигания приводит к отказу в работе всей системы зажигания и двигателя в целом).

По последствиям различают **опасные** и **безопасные** отказы.

Надежность изделий обуславливается их безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью.

Наработка – продолжительность или объем выполненной работы объекта.

Безотказность – свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в течение заданной наработки. Это свойство особенно важно для машин, отказ в работе которых связан с опасностью для людей, с остановкой большого комплекса машин (например, отказ челюстного погрузчика в системе лесосечных машин), с остановкой автоматизированной линии и т. д.

Долговечность – свойство изделия длительно сохранять работоспособность до предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов. При достижении предельного состояния дальнейшая эксплуатация изделия невозможна вследствие снижения эффективности и безопасности. Для невосстанавливаемых изделий понятия безотказности и долговечности практически совпадают.

Ремонтопригодность – приспособленность изделия к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов и повреждений. Поддержание и восстановление работоспособности производится путем технического обслуживания и ремонтов. Это свойство важно с точки зрения огромных затрат на ремонт машин, так как от приспособленности конструкции оборудования к техническому обслуживанию и ремонту зависит время пребывания его в неработоспособном состоянии.

Сохраняемость – свойство изделия сохранять показатели безотказности, долговечности и ремонтпригодности при хранении и транспортировке. Сохраняемость важна для приборов, а также для периодически заменяемого оборудования – аккумуляторов.

Применяют различные показатели надежности.

Для оценки безотказности используют **вероятность безотказной работы**, т. е. вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не возникнет. Различают **среднюю наработку до отказа** и **среднюю наработку на отказ**. Первое – математическое ожидание наработки до отказа невосстанавливаемого изделия. Второе – отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Важный показатель – **интенсивность отказов**. Он отражает надежность невосстанавливаемых изделий и представляет собой отношение среднего числа отказавших в единицу времени объектов к числу объектов, оставшихся работоспособными.

Для восстанавливаемых изделий применяется параметр **потока отказов** – показатель надежности восстанавливаемых изделий, рав-

ный отношению среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольно малую его наработку к значению этой наработки.

Основными показателями долговечности являются технический ресурс и срок службы изделия.

Технический ресурс – суммарная наработка изделия от начала его эксплуатации (или возобновления эксплуатации после ремонта) до предельного состояния (состояния, когда изделие не способно выполнять свои функции в соответствии с назначением). Различают ресурс до первого ремонта, межремонтный, назначенный, средний ресурс. Ресурс оговаривается в технической документации на оборудование и выражается его пробегом, а также в единицах времени и в единицах выпуска продукции.

Для невосстанавливаемых изделий понятия ресурса и наработки до отказа совпадают.

Срок службы – календарная наработка до предельного состояния (измеряется обычно в годах). Для лесозаготовительных тракторов используют понятие технического ресурса в часах, для автомобилей и автопоездов – пробега в километрах.

Показатели долговечности разделяют: на гамма-процентные, средние до текущего (капитального) ремонта, полные, средние до списания. **Гамма-процентные** имеют в среднем обусловленное число γ процентов изделий данного типа или превышают его. Гамма-процентный ресурс является основным расчетным показателем подшипников качения, для которых наиболее часто используют 90%-ный ресурс. Если отказ представляет опасность для людей, принимают 100%-ный ресурс. Для агрегатов тракторов берут 80%-ный ресурс. Этот показатель количественно характеризует случаи ранних разрушений и может быть установлен до завершения испытаний всех образцов. Гамма-процентный ресурс определяет долговечность оборудования при заданной вероятности сохранения его работоспособности.

Показателями ремонтпригодности и сохраняемости выступают: *среднее время восстановления работоспособного состояния, вероятность восстановления работоспособного состояния в заданное время, сроки сохраняемости (средний и гамма-процентный).*

Широко используются комплексные показатели:

а) **коэффициент технического использования** – отношение математического ожидания времени работоспособного состояния оборудования за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени работоспособного состояния и всех простоев для ремонтов и технического обслуживания;

б) *коэффициент готовности* – отношение математических ожиданий времени нахождения в работоспособном состоянии к математическим ожиданиям суммы этого времени и времени внеплановых ремонтов. Коэффициент готовности оборудования характеризует вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме тех периодов, в которых эксплуатация не предусматривается.

Для примера в табл. 1 приведены основные показатели надежности колесных трелевочных машин «Беларус» МЛ-127 производства Минского тракторного завода.

Таблица 1

Показатели надежности трелевочных машин МЛ-127

Показатели	Величина показателя
1. Нарботка до первого капитального ремонта, мото-ч, не менее	8000
2. Средняя наработка на отказ, мото-ч	79,2
3. Удельная суммарная трудоемкость технических обслуживаний, чел.-ч/1000 мото-ч	145
4. Суммарная оперативная продолжительность устранения отказов, ч	88,5
5. Суммарная оперативная трудоемкость устранения отказов, чел.-ч	126,5
6. Удельная суммарная оперативная трудоемкость текущих ремонтов, чел.-ч/1000 мото-ч	177,4
7. Удельная суммарная оперативная трудоемкость технического обслуживания, чел.-ч/1000 мото-ч	145
8. Срок службы, годы	8
9. Коэффициент готовности	0,866
10. Коэффициент технического использования	0,833

2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

2.1. Общие положения

Безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость (ГОСТ 27.002-83) характеризуются количественными единичными и комплексными показателями. Существующая в настоящее время для лесного машиностроения номенклатура показателей надежности в соответствии с оцениваемыми свойствами приведена в табл. 2.

Таблица 2

Номенклатура показателей надежности

Характеризуемые свойства надежности	Показатель	Обозначение
Безотказность	Вероятность безотказной работы	$P(t)$
	Интенсивность отказов	$\lambda(t)$
	Средняя наработка на отказ	T_0
	Средняя наработка до отказа	$T_{\text{ср}}$
	Параметр потока отказов	$\omega(t)$
	Гамма-процентная наработка до отказа	T_γ
	Средний параметр потока отказов	$\omega_{\text{ср}}$
Долговечность	Средний ресурс	T_p
	Гамма-процентный ресурс	$T_{p,\gamma}$
	Средний срок службы	$T_{\text{сл}}$
	Гамма-процентный срок службы	$T_{\text{сл},\gamma}$
Ремонтпригодность	Среднее время восстановления работоспособного состояния	T_v
	Вероятность восстановления работоспособного состояния	$P_v(t)$
	Гамма-процентное время восстановления	$T_{v,\gamma}$
	Интенсивность восстановления	λ_v
	Средняя трудоемкость восстановления	S_v
Другие свойства	Коэффициент сохранения эффективности	$K_{\text{эф}}$
	Коэффициент оперативной готовности	$K_{\text{о.г}}$
	Коэффициент готовности	K_g
	Коэффициент технического использования	$K_{\text{т.и}}$

При эксплуатации лесозаготовительной машины внезапные отказы определяются случайными сочетаниями многих факторов. Рассеяние ресурсов по критериям усталости и износа, изменение действующих нагрузок, механических характеристик материалов деталей и

узлов машин весьма значительны. Поэтому в расчетах надежности многие показатели должны рассматриваться как случайные величины.

Характеристики надежности наиболее полно и объективно могут быть определены в результате экспериментальной проверки, позволяющей оценить влияние всех внешних условий и действующих нагрузок. При этом используют следующие источники информации (рис. 1).



Рис. 1. Источники информации

В общем случае методы статистической обработки информации о случайных величинах (внезапные отказы определяются случайными неблагоприятными сочетаниями нескольких факторов) можно разделить на отдельные группы.

К *первой группе* методов относят простейшие вычисления средних значений наработки между какими-либо событиями, если известны суммарная наработка всех подконтрольных изделий и число рассматриваемых событий (отказов, ремонтов, мероприятий по техническому обслуживанию и т. д.) за период наблюдения.

Во *вторую группу* входят методы расчетов средней величины какого-либо измеряемого признака x , если известны значения данного признака для нескольких наблюдаемых объектов. При этом должна быть получена оценка достоверности и точности расчета среднего значения для принятия решения о возможности распространения полученного результата на любой объект рассматриваемого типа.

К *третьей*, наиболее сложной группе, относятся методы нахождения распределения вероятностей случайных величин, что необходимо для оценки средней наработки до отказа, если за период наблюдения вышла из строя только часть изделий, а также для расчета гамма-процентных ресурсов или вероятности достижения предельного состояния.

Для каждого числа x в диапазоне изменения непрерывной случайной величины X , под которой в конкретных случаях следует понимать соответствующий показатель (наработка на отказ, скорость износа, мощность двигателя и т. д.), существует определенная вероятность $P(X \leq x)$ того, что X не превосходит x . Эта зависимость $F(x) = P(X \leq x)$ называется функцией распределения или функцией вероятности случайной величины X .

Функция $F(x)$ является неубывающей функцией (монотонно возрастающей для непрерывных процессов и ступенчато возрастающей для дискретных процессов). В пределах изменения случайной величины X она изменяется от 0 до 1.

Производная от функции распределения по текущей переменной называется плотностью распределения:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}. \quad (*)$$

Она характеризует частоту повторений данного значения случайной величины. В задачах надежности она широко используется как плотность вероятности [3].

В ряде случаев достаточно характеризовать распределение случайной величины некоторыми числовыми величинами: *математическим ожиданием* (средним значением), *модой* и *медианой*, характеризующими положение центров группирования случайных величин по числовой оси, *дисперсией*, *средним квадратическим отклонением*, *коэффициентом вариации*, характеризующими рассеяние случайной величины. В теории надежности вероятность безотказной работы, как правило, определяется с использованием *квантилей* нормированного нормального распределения.

2.2. Показатели безотказности

К показателям безотказности относятся: *вероятность безотказной работы*, *средняя наработка до отказа*, *интенсивность отказов*, *среднее число отказов*, *наработка на отказ*, *характеристика* и *параметр потока отказов*. Данные показатели в теории надежности могут принимать только положительные значения.

При рассмотрении отказов как случайных событий используются такие характеристики, как плотность распределения (плотность вероятности) отказов $f(x)$, интегральная функция (вероятность) распределения отказов $F(x)$, вероятность безотказной работы (кривая убыви) $R(x)$. Функции $f(x)$ и $F(x)$ связаны зависимостью (*).

При наработке X , не превышающей требуемой x_1 , с помощью плотности распределения находится вероятность появления отказа, т. е.

$$P(X \leq x_1) = \int_0^{x_1} f(z) dz ,$$

где z – переменная интегрирования.

Вероятность появления отказа за наработку X , меньшую требуемой x_1 , можно определить как площадь под кривой $f(x)$ слева от значения x_1 (рис. 2, а).

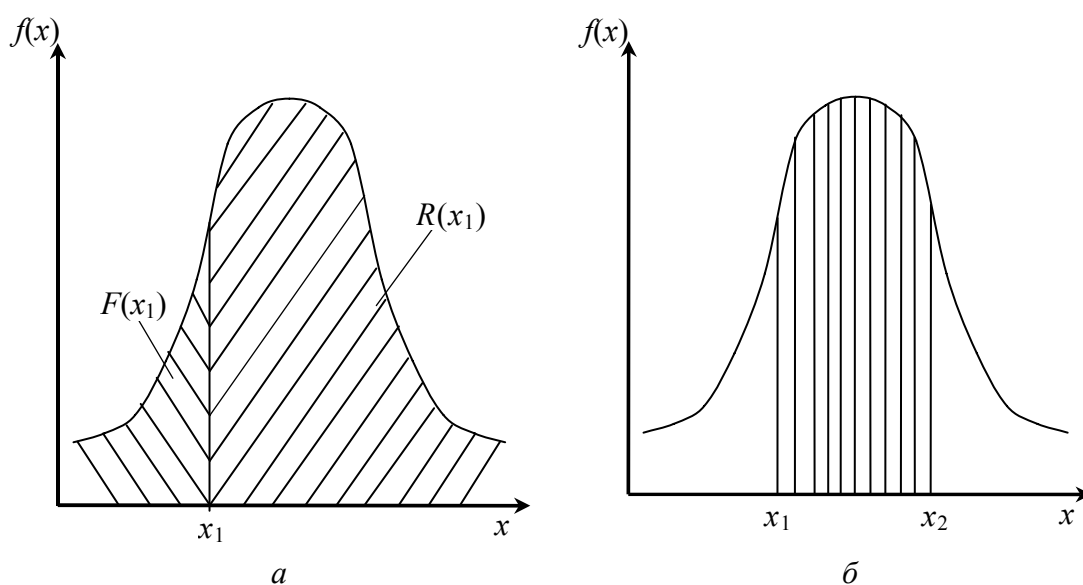


Рис. 2. Графическая интерпретация показателей безотказности:
а – вероятности безотказной работы $R(x_1)$ и отказа $F(x_1)$; б – вероятность $P(x_1 \leq X \leq x_2)$ того, что отказ происходит в промежуток времени от x_1 до x_2

Вероятность безотказной работы $R(x)$, т. е. величину, противоположную $F(x)$, можно найти с помощью плотности распределения. Так как $R(x_1) + F(x_1) = 1$ (изделие может быть только в одном из 2 состояний – отказа или работоспособности), то

$$R(x_1) = P(X > x_1) = 1 - F(x_1) = \int_{x_1}^{\infty} f(z) dz .$$

Вероятность безотказной работы равна площади под кривой $f(x)$ справа от x_1 , т. е. в этом случае наработка X до отказа будет больше требуемой x_1 .

Вероятность того, что случайная величина X заключена между x_1 и x_2 (рис. 2, б), равна:

$$P(x_1 \leq X \leq x_2) = F(x_2) - F(x_1) = \int_0^{x_2} f(z)dz - \int_0^{x_1} f(z)dz = \int_{x_1}^{x_2} f(z)dz.$$

Средняя наработка до отказа:

$$x_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} zf(z)dz.$$

Приведенные формулы выражают связь между функциями распределения $f(x)$ и $F(x)$ [3]. Функции $F(x)$ и $R(x)$ – интегральные, они могут быть представлены графически (рис. 3).

Из рис. 3 по наработке x_i можно найти вероятность появления отказа (потери работоспособности) $F(x_i)$ и вероятность безотказной работы $R(x_i)$ при $X < x_i$.

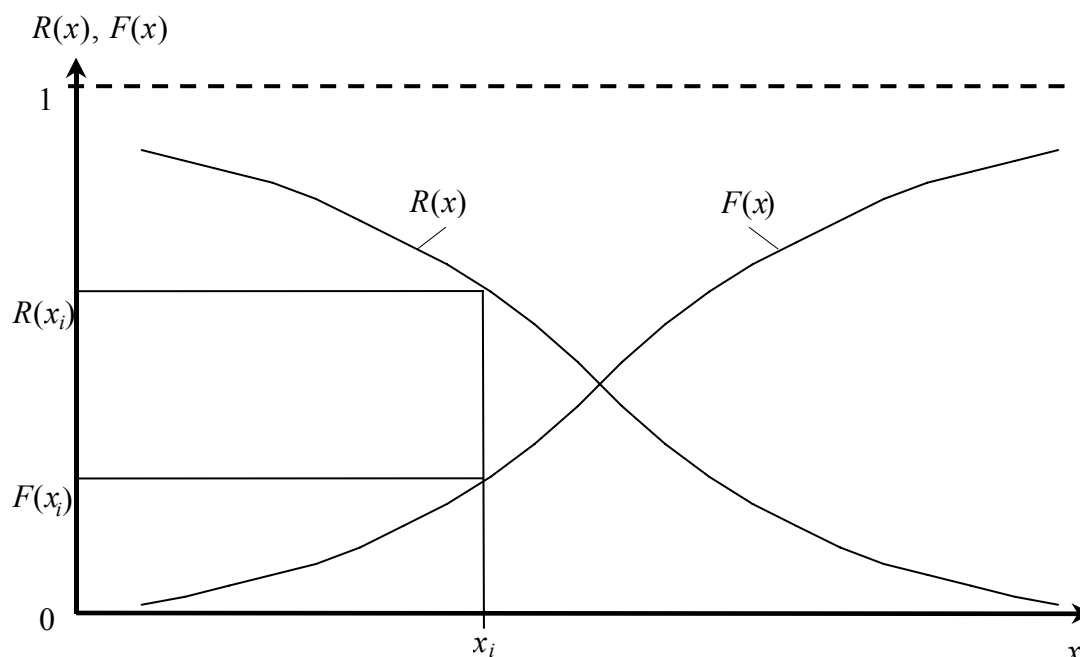


Рис. 3. Функции вероятности безотказной работы $R(x)$ и вероятности отказа $F(x)$

Для ряда расчетов рассматривают функцию, называемую интенсивностью отказов (см. рис. 5 на с. 21):

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{F(x)},$$

где $F(x)$ – вероятность появления отказа.

При умножении интенсивности отказов на наработку Δx получаем долю элементов, которые безотказно работали до наработки x и, веро-

ятно, выйдут из строя при наработках в пределах от x до $(x + \Delta x)$ (Δx должна быть малой величиной).

В зависимости от интенсивности отказов можно разделить наработку на три периода: I – приработка; II – нормальная эксплуатация; III – выход в предельное состояние (рис. 4).

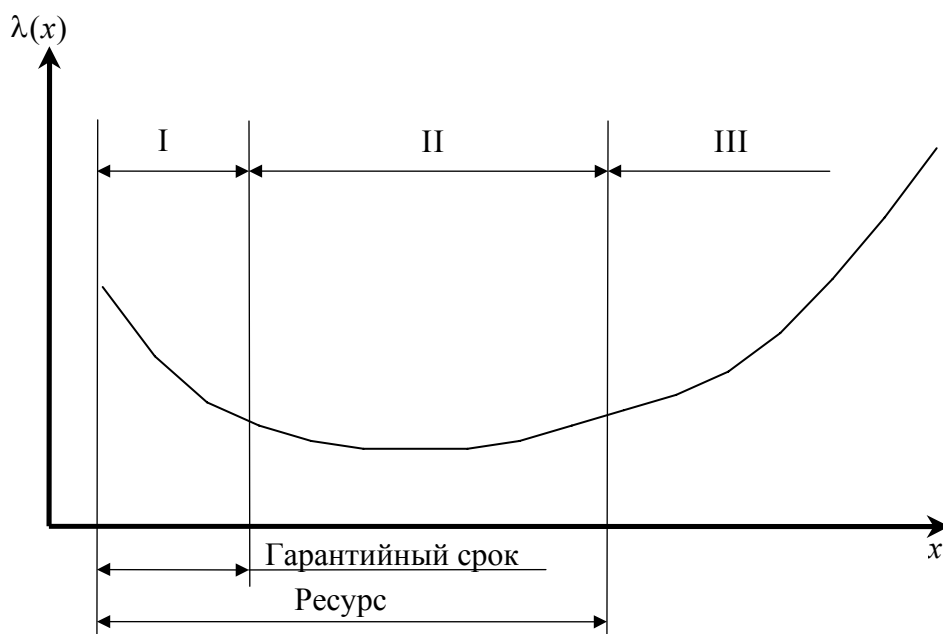


Рис. 4. График изменения интенсивности отказов

В первый период интенсивность отказов повышена из-за ранних или приработочных отказов, обусловленных дефектами производства. Во второй период интенсивность отказов почти постоянна и близка к минимальной. В третий период начинаются отказы в результате интенсивного износа, усталостных разрушений, старения и др.

Для приближенного нахождения показателей безотказной работы, определяемых при испытаниях, необходимо знать их наработки до отказа или до конца наблюдений: x_1, x_2, \dots, x_N .

Тогда вероятность появления отказа*:

$$F(x_0) = \frac{N'}{N},$$

где x_0 – наработка, когда отказало N' и сохранило работоспособность $N'' = N - N'$ изделий.

*В связи с тем, что в литературе часто используют термин «вероятность» вместо «частота», в излагаемом ниже материале используется аналогичная терминология.

Вероятность безотказной работы:

$$R(x_0) = \frac{N''}{N}.$$

Вероятность безотказной работы – достаточно удобный показатель, однако для высоконадежных изделий целесообразнее пользоваться вероятностью $F = 1 - R$. Можно пользоваться также относительными величинами – числом отказов на одно изделие, на 100 изделий и т. д.

Средняя наработка до отказа:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N},$$

где x_i – наработка i -го испытуемого объекта до отказа; N – число объектов.

Эта формула справедлива, если все N объектов отказывают, если же из N объектов за время t отказало r объектов, то

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^r x_i + t(N - r)}{N}.$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda(x) = \frac{\Delta N}{N \Delta x},$$

где ΔN – число отказавших объектов за малую наработку Δx ; N – число работоспособных объектов к началу рассматриваемой наработки.

Перечисленные показатели относятся к невосстанавливаемым объектам. В отличие от них у восстанавливаемых объектов после возникновения отказов происходит восстановление и их работа продолжается. Имеем $N = \text{const}$, число отказов $m < N$ в потоке отказов и восстановлений. Потоки отказов необходимо знать как для оценки безотказности объекта, так и для оценки потоков восстановления, что необходимо для расчета ремонтных средств, сопровождающих работу объектов.

Характеристиками потока отказов являются среднее число отказов $m_c(x)$ и параметр потока отказов $\omega(x)$.

Среднее число отказов:

$$m_c(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(x),$$

где x – наработка; N – число объектов; $m_i(x)$ – число отказов каждого из N объектов.

Среднее число отказов при $N \rightarrow \infty$ стремится к пределу $H(x)$:

$$H(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} m_c(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(x).$$

$H(x)$ назовем характеристикой потока отказов, которая зависит от периода эксплуатации объекта.

Функция $H(x)$ при нормальной эксплуатации возрастает, а в период приработки может убывать. Интенсивность изменения характеристики потока отказов во времени – параметр потока отказов $\omega(x)$, определяющий среднее число отказов в единицу времени вблизи наработки x – равен:

$$\omega(x) = \frac{dH(x)}{dx}.$$

Для конечного числа объектов можно записать:

$$\omega(x) \approx \frac{\sum_{i=1}^N m_i(x + \Delta x) - \sum_{i=1}^N m_i(x)}{N \Delta x} = \frac{\Delta m_c(x)}{\Delta x};$$

$$\omega(x) \approx \frac{\Delta m_c(x)}{\Delta x}.$$

С учетом вероятности $F(x)$ появления отказа в интервале от x_1 до x_2 параметр потока отказов:

$$\omega(x) = \frac{dF(x)}{dx}.$$

Таким образом, параметр потока отказов за наработку x равен вероятности отказа объекта на единицу наработки в единицу времени.

Суммарный поток отказов для сложных изделий равен сумме потоков отказов составляющих элементов:

$$m_{c0}(x) = m_{c1}(x) + m_{c2}(x) + \dots + m_{cn}(x).$$

После дифференцирования по x получим параметр суммарного потока отказов:

$$\omega(x) = \omega_1(x) + \omega_2(x) + \dots + \omega_n(x).$$

Данный параметр равен сумме параметров составляющих потоков. Для транспортных машин определяют параметры потока отказов с учетом наработки с начала эксплуатации (размерность параметра потока равна размерности наработки – 1 ч, 1 км, 1 м³ и т. д.). Общее уравнение для определения наработки на отказ для периода $(x_2 - x_1)$:

$$x = \frac{x_2 - x_1}{H(x_2) - H(x_1)} \approx \frac{x_2 - x_1}{m_c(x_2) - m_c(x_1)}.$$

Стационарный поток (число отказов зависит от величины наработки $(x_2 - x_1)$ и не зависит от величины x_1 или x_2) – распространенный вид потока отказов. Он характерен для периода нормальной эксплуатации, но не для приработки.

Характеристика потока $H(x)$ в период II (рис. 5) – линейная функция:

$$H(x) = H(x_0) + \omega(x - x_0),$$

где x_0 – наработка, соответствующая времени приработки.

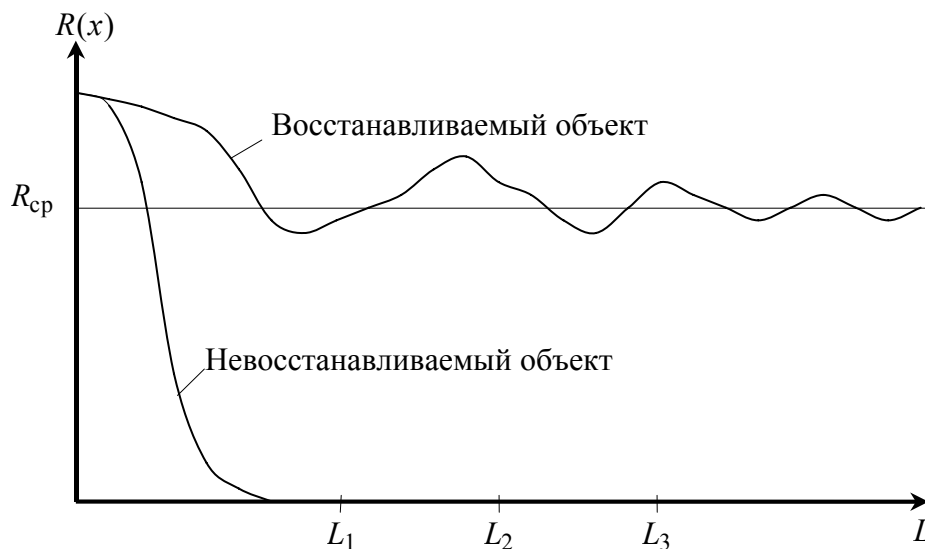


Рис. 5. Зависимости вероятности безотказной работы от наработки

Для стационарного потока $\omega = \text{const}$, но для того чтобы $H(x)$ было линейным, отказы должны возникать по одному и не обуславливать взаимного их появления, т. е. должно соблюдаться требование ординарности – при любой наработке одновременно возникает не более одного отказа. Должен также соблюдаться принцип последействия: отказ одних элементов не должен вызывать отказ других и изменять параметры потока. Но так не всегда происходит, особенно в случае перенапряжения конструкций, когда появляются скрытые повреждения, приводящие к отказам позже.

Случайный процесс называется **марковским** (или процессом без последействия), если для каждого значения x_0 вероятность любого состояния системы в будущем для интервала наработки от x_0 до $(x_0 + \Delta x)$

зависит только от состояния системы в начальный момент x_0 и не зависит от того, каким образом система пришла в это первоначальное состояние.

Понятия интенсивности отказов $\lambda(x)$ для невосстанавливаемого объекта и параметра потока отказов $\omega(x)$ для восстанавливаемого объекта родственны. В случае ординарного потока без последствия они совпадают. При этом многие выражения упрощаются.

Существует различие параметров безотказности различных объектов. Например, у невосстанавливаемого вероятность безотказной работы с наработкой падает, а у восстанавливаемого может в среднем сохраняться, что является следствием замены при наработках L (рис. 5).

Значение R_{cp} характеризует средний уровень безотказности. При лучшей организации эксплуатации лесных машин достигается и более высокое значение R_{cp} . Кривые $R(x)$ для невосстанавливаемого объекта характеризуют его долговечность, а для восстанавливаемого, кроме того, и организацию эксплуатации (замен, восстановлений и т. д.).

2.3. Показатели долговечности

Долговечность оценивается по **ресурсу** (наработке) и по **сроку службы** (год, месяц). Различие между этими показателями состоит в том, что ресурс учитывает фактическую наработку (например, пробег автомобиля), а срок службы – суммарную продолжительность работы с включением простоев. Поэтому два одинаковых изделия могут иметь одинаковый ресурс, но разные сроки службы. На рис. 6 показаны применяемые для определения показателей долговечности кривые убыли объектов (*а*) и распределения ресурса (*б*).

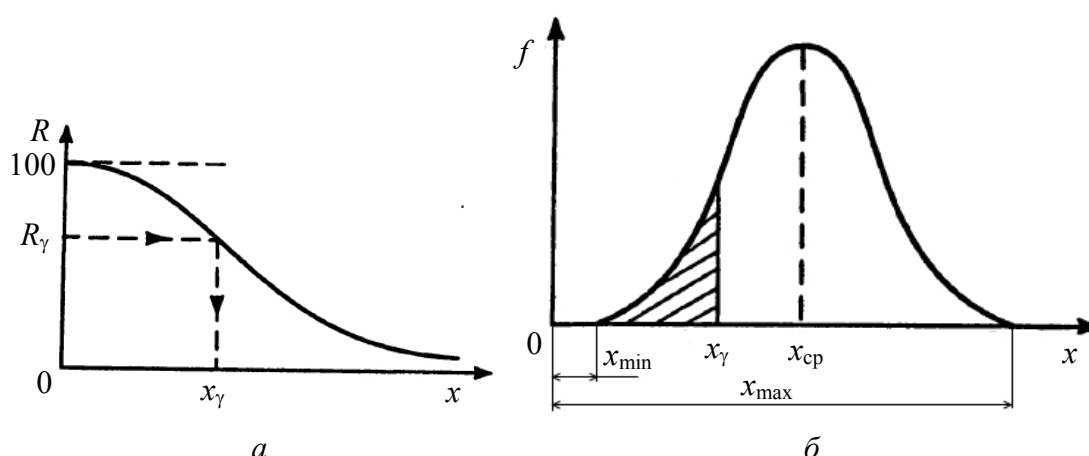


Рис. 6. Кривые убыли (*а*) и распределения ресурса (*б*)

Показателями долговечности являются: гамма-процентный ресурс x_γ (срок службы); медианный $x_{\text{мед}}$, или гамма-процентный ресурс x_{50} при $\gamma = 50\%$; средний ресурс, т. е. среднее значение для совокупности объектов; назначенный ресурс, т. е. ресурс, при котором эксплуатация должна быть прекращена независимо от состояния объекта; ресурс до 1-го капремонта; ресурс до списания $x_{\text{пр}}$; минимальный ресурс x_{min} , в течение которого нет ни одного отказа.

Гамма-процентный ресурс характеризует ранние отказы, срок гарантии, потребность в запасных частях, минимальную долговечность объекта и является одним из основных показателей надежности машин.

Средний ресурс $x_{\text{ср}}$, учитывающий долговечность всех объектов, в том числе и соответствующих крайним значениям ресурса, важен для расчетов расхода запасных частей и агрегатов, планирования убыли и пополнения парка машин, числа ремонтов, эффективности эксплуатации и ремонта оборудования и т. д. Для невозстанавливаемого объекта исходной зависимостью для определения показателей долговечности является кривая убыли ресурса (рис. 6, а) [4]. По ней определяют показатели x_{min} , x_γ и $x_{\text{пр}}$.

В условиях эксплуатации для восстанавливаемого объекта ресурсы до капитального ремонта и до списания, а также межремонтный период определяются специальными условиями. Так, например, при агрегатно-узловом методе ремонта грузовой автомобиль считается вышедшим в капитальный ремонт, если 5 или 6 основных агрегатов требуют ремонта (двигатель, коробка передач, мосты и др.).

Нормативное (среднее) значение ресурса автомобиля, например в зависимости от условий движения, может сильно изменяться (в два и более раза). Размахи варьирования при нормальном законе распределения наработок до капитального ремонта могут быть определены зависимостями $x_{\text{min}} = 0,4x_{\text{ср}}$; $x_{\text{max}} = 1,6x_{\text{ср}}$.

Теоретически для автомобиля в благоприятных условиях (с вероятностью 90%) ресурс составляет 90–370 тыс. км.

Помимо показателей безотказности и долговечности, существуют показатели ремонтпригодности и сохраняемости, которые здесь не описываются, так как они рассматриваются подробно в соответствующих специальных курсах. Из комплексных показателей надежности широко применяется коэффициент технического использования, значение которого для группы машин позволяет оценить вероятность их работоспособного состояния в плановом обслуживании и ремонте. Он равен:

$$k_{\text{ти}} = \frac{t_{\text{сум}}}{t_{\text{сум}} + t_{\text{р}} + t_{\text{то}}},$$

где $t_{\text{сум}}$ – суммарная наработка; $t_{\text{р}}$ – простой в ремонтах; $t_{\text{то}}$ – простой в техническом обслуживании.

Если $k_{\text{ти}} = 0,9$, то это означает, что в среднем 90% оборудования работоспособно, а 10% находится в плановом техническом обслуживании и ремонте.

2.4. Надежность и законы распределения случайных величин

Наблюдения при испытаниях или эксплуатации осуществляются по специальному плану. Это нужно для оценки надежности изделий. Могут быть два случая: известна статистическая модель объекта с ее законами распределения случайной величины; статистическая модель неизвестна.

В последнем случае необходимо определить непосредственно числовые значения (точечные оценки) показателей надежности: средние (наработка до отказа, ресурс, срок службы, срок сохраняемости, время восстановления); гамма-процентные (ресурс, срок службы, срок сохраняемости); вероятности безотказной работы, интенсивности отказов.

Часто встречается другая задача, когда известна статистическая модель, а необходимо найти характеристики надежности системы, т. е. характеристики распределения наработки до отказа и других случайных величин, определяющих надежность изделия, например плотность распределения $f(x)$ и др. Исходными данными для определения распределения являются обычно наблюдаемые значения случайной величины, сгруппированные по частоте появления, т. е. эмпирическая плотность распределения. При обработке построенной гистограммы переходят от эмпирического распределения к той или иной статистической модели и подбирают то или иное распределение. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся распределения.

Экспоненциальное распределение – распространенная модель для времени безотказной работы. Используется при определении показателей надежности в период нормальной эксплуатации, т. е. в период после окончания приработки изделия и до существенного проявления постепенных отказов. На этом этапе отказы еще не проявляются, и надежность изделия характеризуется внезапными отказами. Экспоненциальное распределение удобно для описания несистемных отказов, так как предполагается, что события (отказы) происходят независимо одно от другого. Оно часто успешно может быть применено, когда каждый

отказавший элемент немедленно заменяется работоспособным. Экспоненциальное распределение является однопараметрическим, т. е. зависит от одного параметра λ ($\lambda \geq 0$) – интенсивности отказов для невосстанавливаемых изделий или параметра потока отказов для восстанавливаемых [3]. У невосстанавливаемых изделий рассматриваются первичные отказы, у восстанавливаемых – первичные и вторичные.

Плотность распределения отказов:

$$f(x, \lambda) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda x) & \text{при } x \geq 0, \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Интегральная функция распределения отказов:

$$F(x, \lambda) = \int_0^x \lambda \exp(-\lambda z) dz = 1 - \exp(-\lambda x) \text{ при } x \geq 0.$$

Функция безотказной работы:

$$R(x, \lambda) = 1 - F(x, \lambda) = \exp(-\lambda x) \text{ при } x \geq 0.$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda(x) = \frac{\lambda \exp(-\lambda x)}{\exp(-\lambda x)} = \lambda = \text{const.}$$

Постоянство λ предполагает независимость вероятности отказа элемента от его предыстории. Например, прокол шины в равной степени вероятен после 5 или 10 тыс. км пробега, удар падающего дерева при валке в равной степени вероятен как после 5, так и после 20 часов работы валочно-пакетирующей машины.

Если не имеется отказов в течение наработки x_0 , то

$$f(x, \lambda, x_0) = \begin{cases} \lambda \exp[-\lambda(x - x_0)] & \text{при } x \geq x_0, \lambda \geq 0, \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

При этом средняя наработка (матожидание) до отказа $x_{\text{ср}} = 1/\lambda$ (классическое экспоненциальное распределение), если нет отказов в течение наработки x_0 , то $x_{\text{ср}} = x_0 + 1/\lambda$; гамма-процентный ресурс $P(x_\gamma) = \exp(-\lambda x_\gamma) = 0,01\gamma$, откуда после логарифмирования будем иметь:

$$x_\gamma = -\frac{\ln 0,01\gamma}{\lambda} = x_{\text{ср}}(-\ln 0,01\gamma).$$

Наиболее часто используемая статистическая модель – **нормальное (или гауссово) распределение**. Это распределение является самым

универсальным и удобным и широко применяется для расчетов надежности изделий в период постепенных отказов. Нормальному распределению подчиняется наработка до отказа многих восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий, размеры и ошибки измерений деталей и т. д.

Нормальное распределение имеет два независимых параметра: математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение [3].

Плотность нормального распределения:

$$f(x, m_x, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma^2}\right] \text{ при } 0 < x < \infty; 0 < m_x < \infty; \sigma > 0,$$

где m_x – среднее значение или матожидание (характеризуют центр распределения); σ – среднее квадратичное отклонение случайной величины X .

Интегральная функция при условии $m_x > 3\sigma$:

$$F(x, m_x, \sigma) \approx \int_0^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z - m_x)^2}{2\sigma^2}\right] dz.$$

Функция безотказной работы:

$$R(x, m_x, \sigma) \approx F_0\left(\frac{m_x - x}{\sigma}\right) = F_0(z),$$

где $F_0(z)$ – табулированная функция:

$$F_0(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-0,5t^2) dt.$$

По смыслу наработка до отказа может быть только положительной, поэтому приведенные выражения справедливы, когда $\sigma < m_x/3$ или коэффициент вариации $v = \sigma/m_x < 1/3$, т. е. при достаточно малых σ .

На практике вероятность безотказной работы и вероятность отказа вычисляются с помощью квантилей нормированного нормального распределения U_p , каждому из которых соответствует величина вероятности безотказной работы P , выбираемая по таблицам (см. табл. 3, с. 47).

Помимо задачи оценки вероятности безотказной работы за данное время или за данную наработку встречается обратная задача – определение времени или наработки, соответствующих заданной вероятности безотказной работы. Значение этой наработки (времени) определяют с помощью квантилей нормированного нормального распределения:

$$t = m_x + U_p \sigma.$$

Значения квантилей в этом случае принимаются по таблицам в зависимости от требуемой вероятности.

Операции с нормальным распределением проще, чем с другими, поэтому ими часто заменяют другие распределения.

В случае **логнормального распределения** логарифм случайной величины распределен по нормальному закону. Это распределение может приниматься в качестве распределения времени безотказной работы. Если нормальное распределение имеет место при сложении погрешностей, то логарифмически-нормальное распределение предполагает, что случайная величина получается в результате перемножения большого числа небольших погрешностей. Оно может описать самые различные случайные процессы [3].

Плотность распределения будет:

$$f(x, m_x, \sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} (\ln x - m_x)^2 \right] & \text{при } x > 0, -\infty < m_x < \infty, \sigma > 0, \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

При появлении отказов только после некоторого значения x_0 плотность распределения определяется выражением

$$f(x, m_x, \sigma) = \frac{1}{\sigma(x - x_0) \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} (\ln \{x - x_0\} - m_x)^2 \right] \text{ при } x \geq x_0, \sigma > 0.$$

Более универсальным является **распределение Вейбулла**, его применяют для описания наработки деталей по усталостным разрушениям, наработки до отказа подшипников. Широко используется для оценки надежности деталей и узлов машин, в частности, лесовозных тягачей, подъемно-транспортных и других машин. Применяется также для оценки надежности по приработочным отказам.

Распределение Вейбулла двухпараметрическое, его плотность:

$$f(x, a, b) = \begin{cases} (b/a)(x/a)^{b-1} \exp \left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b \right] & \text{при } x \geq 0, a > 0, b > 0, \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases}$$

где a – параметр масштаба; b – параметр формы, характеризующий рассеяние случайной величины.

Интегральная функция распределения отказов равна:

$$F(x, a, b) = \int_0^x (b/a)(z/a)^{b-1} \exp \left[-\left(\frac{z}{a}\right)^b \right] dz = 1 - \exp \left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b \right], \text{ при } x > 0.$$

При произвольном начале отсчета получают:

$$f(x, a, b) = \begin{cases} (b/a) \left(\frac{x - x_0}{a} \right)^{b-1} \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{a} \right)^b \right], & \text{при } x \geq x_0, \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad a > 0, b > 0;$$

Имеется в виду, что при имеющейся наработке отказы не наступают, функция безотказной работы, интенсивность отказов и средняя наработка до отказа определяются выражениями:

$$R(x, a, b, x_0) = \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{a} \right)^b \right], \text{ при } x \geq x_0;$$

$$\lambda(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x - x_0}{a} \right)^{b-1};$$

$$x_{\text{ср}} = a \Gamma \left(1 + \frac{1}{b} \right),$$

где Γ – гамма-функция (принимается по справочным данным).

Гамма-процентный ресурс равен:

$$\gamma = 100 \exp \left\{ - \left(\frac{x_\gamma}{a} \right)^b \right\}.$$

Распределение Вейбулла может соответствовать различным случаям изменения вероятности отказов: при $b < 1,0$ плотность распределения имеет вид убывающей функции, при $b = 1$ – совпадает с экспоненциальным (рис. 7).

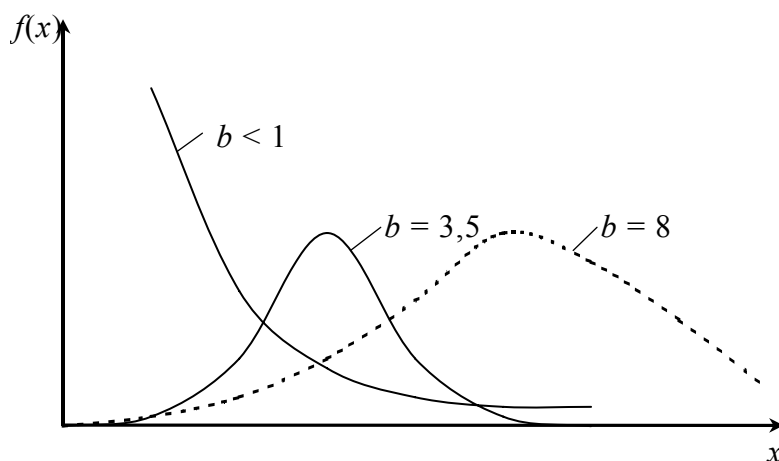


Рис. 7. Плотность распределения Вейбулла

Если известны лишь общие характеристики случайной величины $x_{\text{ср}}$ и x_{σ} , а необходимо найти закон ее распределения, то для этого используют коэффициент вариации:

$$v = \frac{x_{\sigma}}{x_{\text{ср}}}.$$

Зная значение v , можно предварительно оценить, среди каких законов распределения находится искомый. В результате обобщений по технической эксплуатации автомобилей установлены средние значения коэффициентов вариации при различных законах распределения: нормальный – $v = 0,25$; Вейбулла – $v = 0,44$; логнормальный – $v = 0,681$.

Для сложных изделий, включающих элементы с различной природой отказов, возникает необходимость найти закон распределения как сочетание различных распределений. Для таких случаев может быть сформулирована следующая задача. Независимые случайные величины X_1, X_2, \dots, X_n заданы плотностями распределения $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$. Сложная величина равна сумме независимых случайных величин $X = X_1 + X_2 + \dots + X_n$. Эта сумма является случайной величиной с искомой плотностью $f(x)$. Соответствующий ей закон распределения является композицией законов $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$. Матожидание и дисперсия композиции равны суммам матожиданий соответствующих характеристик независимых случайных величин. Выражение для определения среднего квадратического отклонения выглядит следующим образом:

$$\sigma(X) = \sqrt{\sigma^2(X_1) + \sigma^2(X_2) + \dots + \sigma^2(X_n)}.$$

3. ПРИЧИНЫ ПОТЕРИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ НАДЕЖНОСТИ ЛЕСОТРАНСПОРТНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

3.1. Причины потери работоспособности

Процессы, предопределяющие отказы и потерю работоспособности оборудования, протекают непрерывно и являются следствием эксплуатационных нагрузок на детали и узлы, износных и химических явлений, нарушения регулировок и креплений.

Анализ надежности трелевочной машины МЛ-127 в условиях Нючпасского лесопункта ООО «Койгородский лесокомбинат» республики Коми показал, что наибольшее число отказов приходится на гидросистему (14–20%) и технологическое оборудование (15–25%). Установлено, что одной из причин отказов является недостаточная прочность и жесткость деталей защитно-опорного щита.

Общие причины отказов:

- 1) разрушение из-за усталости материала и снижения прочности;
- 2) изменение размеров и формы деталей из-за износа;
- 3) деформация и заклинивание подвижных сопряжений из-за пиковых нагрузок;
- 4) разрушения и повреждения из-за коррозии;
- 5) совместное действие нагрузок, износа и химически активных сред.

Нарушение регулировок (клапанный механизм, зацепление в редукторе и т. д.), нарушение креплений агрегатов (головки блока, редуктора рулевого управления) – также причины частых отказов.

Усталостные разрушения начинаются с появления трудно обнаруживаемых микроскопических трещин, причем максимальные динамические нагрузки, их вызывающие, меньше, чем при статическом разрушении.

Следует все же иметь в виду, что наиболее частой причиной отказов является износ трущихся элементов деталей машин. Внешнее трение и износ возникают при относительном перемещении сопряженных поверхностей деталей.

Внешнее трение имеет место, например, между поверхностью дороги и движителем машины. За счет него появляются внешние силы, движущие автомобиль или трактор или вызывающие их торможение. В этом смысле внешнее трение полезно. Но при этом происходит и износ шин колес или гусениц – в данном случае оно вредно. Кроме того, есть и затраты энергии на преодоление сил трения. Износ ходо-

вой части и других агрегатов и деталей имеет решающее влияние на долговечность и эксплуатационную надежность оборудования.

Выделяют три периода, характеризующие динамику процесса изнашивания деталей: I – период приработки; II – период нормального изнашивания; III – период аварийного износа (рис. 8).

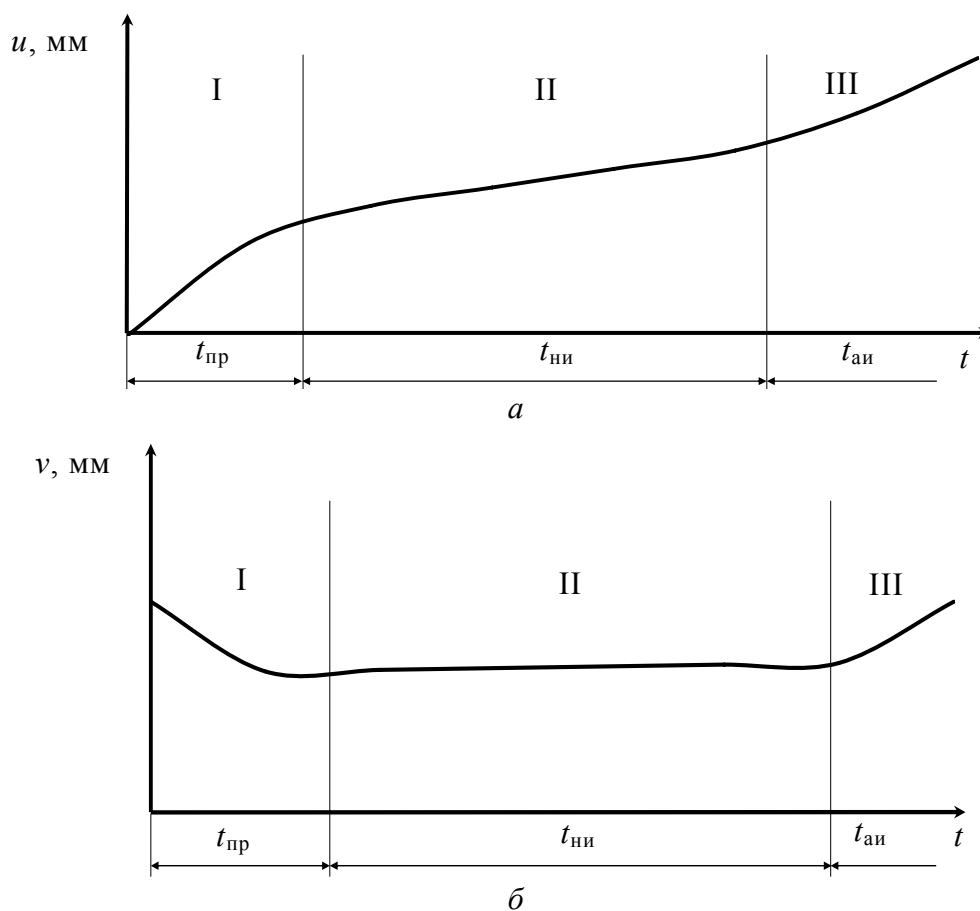


Рис. 8. Общие закономерности изнашивания:

a – функция абсолютного износа от времени $u(t)$;

b – функция скорости изнашивания от времени $v(t)$:

u – абсолютный износ; v – скорость изнашивания; $t_{\text{пр}}$ – время приработки;
 $t_{\text{ни}}$ – время нормального изнашивания; $t_{\text{аи}}$ – время аварийного изнашивания

В первый период наблюдается довольно интенсивный износ, но скорость изнашивания на протяжении этого периода снижается, проявляются приработочные отказы, а интенсивность постепенно уменьшается.

3.2. Общие сведения о трении

Наука, занимающаяся вопросами контактного взаимодействия твердых тел при их относительном движении, вопросами трения,

изнашивания и смазки деталей, называется **триботехникой**. В триботехнике выделяют следующие разделы – трибофизика, трибомеханика и трибохимия.

Трение обусловлено молекулярно-механическими взаимодействиями – на площадках контакта поверхностей действуют силы молекулярного притяжения на расстояниях, превышающих межатомное расстояние в кристаллических решетках в десятки раз. Эти силы многократно увеличиваются с повышением температуры. Молекулярные силы при наличии или отсутствии между трущимися поверхностями смазки, загрязнения или влаги вызывают адгезию. **Адгезия** – слипание разнородных твердых или жидких тел, соприкасающихся своими поверхностями. Адгезия также может быть обусловлена и действием электрических сил.

Выделяются две группы деталей по условиям изнашивания:

- 1) детали взаимного трения в сопряжениях;
- 2) детали, трущиеся при их взаимодействии со средой или перерабатываемым материалом.

Взаимодействие поверхностей трения приводит к образованию поверхностных связей и их разрушению. Происходит упругопластическая деформация поверхностных слоев трущихся деталей. В результате возникают и развиваются вторичные физические, химические и механические процессы.

Основной характеристикой внешнего трения является *сила трения* – сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого:

$$F = fN,$$

где f – коэффициент трения; N – нормальная составляющая силы взаимодействия поверхностей.

Коэффициент трения – отношение силы трения к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу.

Согласно Кулону, который указал на двойственную природу трения:

$$F = A + fN,$$

где A – коэффициент, учитывающий сопротивление от сцепляемости поверхностей трения.

По атомно-молекулярной теории трения

$$F = fS_{\phi}(P_0 + P),$$

где S_{ϕ} – площадь фактического контакта; P_0 – удельная сила молекулярного взаимодействия; P – нормальное давление.

Согласно молекулярно-механической теории сухого трения:

$$F = \tau_{\text{мех}} + \tau_{\text{мол}} = \alpha S_{\text{ф}} + \beta P,$$

где $\tau_{\text{мех}}$ и $\tau_{\text{мол}}$ – составляющие силы трения механического и соответственно молекулярного происхождения; α и β – коэффициенты, определяемые опытным путем.

По гидродинамической теории жидкостного трения:

$$F = \frac{vS\eta}{h},$$

где v – относительная скорость перемещения трущихся поверхностей; S – площадь поверхностей, скользящих одна относительно другой; η – абсолютная вязкость масла; h – толщина масляного слоя.

Сложные явления трения и изнашивания определяются с учетом комплекса механических, физических и химических процессов. Эти явления, а следовательно, и износ деталей машин зависят от качества трущихся поверхностей.

Существуют следующие показатели качества поверхностей: форма, волнистость, шероховатость, твердость, теплостойкость, химическая стойкость, напряженность состояния.

Геометрия поверхности деталей зависит от вида механической обработки, внутреннего строения и нагружения при эксплуатации.

Технологический рельеф, обусловленный технологией обработки, быстро исчезает при приработке. В процессе эксплуатации формируется рабочий рельеф.

Имеют значение физико-механические свойства и напряженное состояние поверхностных слоев, толщина которых находится в пределах от десятков ангстрем до сотых и десятых долей миллиметра. Данные слои характеризуются, как правило, структурой и свойствами, отличными от основного материала детали. Это зависит от свойства адсорбционной активности, суммы механических, тепловых и физико-химических воздействий при технологической обработке, от циклических воздействий при нагружении в эксплуатационных условиях.

При обработке детали преследуется цель создания заданных размеров, формы, шероховатости и твердости ее поверхности. Если дополнительно учесть направление шероховатости, толщину поверхностного слоя и его физико-химико-механические свойства, а также условия работы детали, то можно сократить период приработочных отказов и повысить долговечность. Если детали дополнительно под-

вергнуть специальной технологической обработке, то долговечность сопряжения значительно повысится. Например, при упрочнении поверхности ряда трущихся деталей двигателя термодиффузионным хромированием продлевается долговечность сопряжения. Такая обработка регулировочного болта толкателя топливного насоса повышает его долговечность в 10 раз.

3.3. Классификация видов трения и изнашивания

В соответствии с ГОСТ 23.002-78 различают (в зависимости от состояния трущихся поверхностей) трение покоя и трение движения (рис. 9).

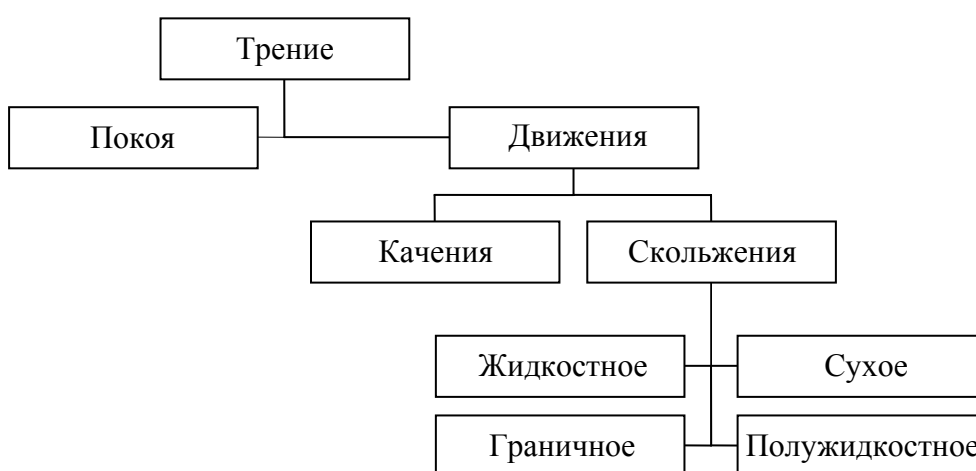


Рис. 9. Классификация трения по характеру относительного перемещения деталей

В зависимости от характера относительного движения двух тел существуют следующие виды трения [5]:

1) *внешнее трение* – явление сопротивления относительному перемещению, возникающее между двумя твердыми телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии;

2) *трение покоя* – трение двух тел при микроперемещениях до перехода к относительному движению;

3) *трение движения* – трение двух тел, находящихся в относительном движении;

4) *трение скольжения* (трение первого рода) – трение движения двух твердых тел, при котором скорости тел в точках касания различны по величине и направлению, или только по величине, или только по направлению;

5) *трение качения* (трение второго рода) – трение движения двух твердых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы по величине и направлению.

В свою очередь трение скольжения классифицируется следующим образом [5].

Жидкостное трение – поверхности трения разделены смазочным материалом, проявляющим объемные свойства (смазка – действие смазочного материала, в результате которого между двумя поверхностями уменьшается сила трения и интенсивность изнашивания). Такое трение характеризуется малыми значениями коэффициента трения и с точки зрения потерь энергии, долговечности и износостойкости является предпочтительным для трущихся деталей машин. При жидкостной смазке силы трения не зависят от природы контактирующих поверхностей.

Недостатками жидкостного трения являются усложнение конструкции смазочной системы и наличие масляного слоя между трущимися поверхностями, величина которого зависит от нагрузки и может нарушить точность перемещения всего узла в целом.

Граничное трение – поверхности сопряженных тел разделены слоем смазочного материала небольшой толщины начиная с толщины одной молекулы (до 0,1 мкм). Граничный слой смазки в сравнении с сухим трением снижает силы трения в 2–10 раз и износ поверхностей трения в сотни раз. При граничной смазке силы трения зависят как от характеристик сопряженных материалов, так и свойств смазочного материала.

Недостатком такого трения является невозобновляемость смазочной пленки, т. е. в процессе работы масло пленки уносится с поверхности трения продуктами износа.

Сухое трение – контактирующие поверхности покрыты только оксидными пленками или пленками воды и газа. Такое трение присутствует в тех передачах и узлах трения, где недопустимо или невозможно применение смазочных материалов, либо их применение невозможно из-за высоких температур в зоне контакта (сухие муфты сцепления, фрикционные накладки тормозных механизмов, шарнирные соединения траков гусеничных лент и т. д.).

Для снижения силы трения и интенсивности изнашивания узлов трения одно из тел трения изготавливают из композитного материала, содержащего твердое смазывающее вещество (графит, дисульфид молибдена, диселенит вольфрама).

Полужидкостное трение – между контактирующими поверхностями присутствует одновременно жидкостная и граничная смазка.

На рис. 10 схематически приведено влияние вида трения на нагрузку микровыступов поверхности трения.

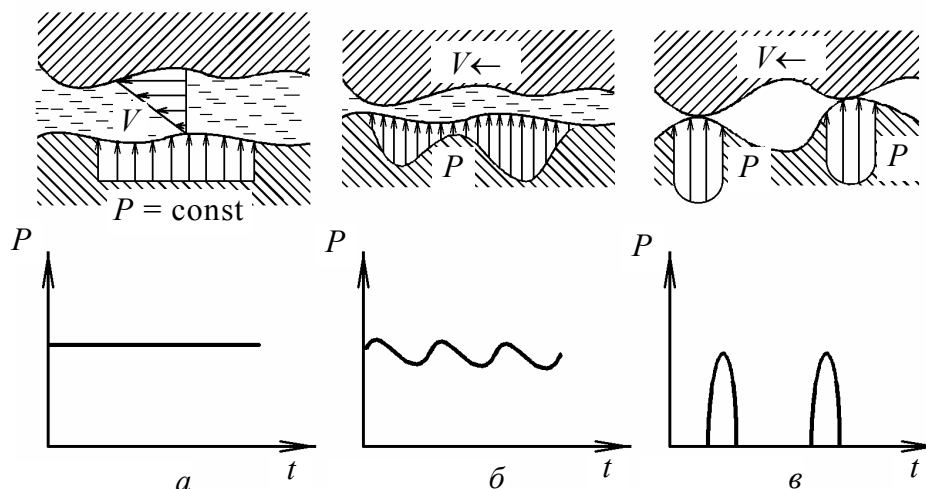


Рис. 10. Влияние вида трения на нагрузку микровыступов поверхности трения:
а – жидкостное трение; б – граничное трение; в – сухое трение

При жидкостном трении (рис. 10, а) каждый участок поверхности нагружен постоянной нагрузкой, которая не изменяется при перемещении поверхности. Эта нагрузка не может разрушить микровыступы, так как возникающие напряжения не превышают предел прочности.

При граничном трении (рис. 10, б) существуют более нагруженные зоны в местах сближения микровыступов. В этом случае при движении трущихся поверхностей возникают колебания напряжений и создаются условия для усталостного разрушения, однако слой смазочного материала предотвращает молекулярное взаимодействие.

При сухом трении (рис. 10, в) микровыступы находятся в непосредственном контакте, и происходит концентрация нагрузки в определенных зонах. В этом случае создаются условия для усталостного разрушения или пластической деформации микровыступов, что приводит к усталостному или абразивному разрушению, а при наличии оксидных пленок – к окислительному изнашиванию [5].

Различают изнашивание и износ [5]. При **изнашивании** имеет место постепенное изменение размеров тела при трении, проявляющееся в отделении с поверхности трения материалов и в его пластической деформации. Изнашивание может сопровождаться коррозией. Результатом изнашивания является **износ** [5]. Величина износа может быть выражена в единицах длины, массы, объема и т. д.

Процесс изнашивания включает три стадии: взаимодействие поверхностей трения; изменения в поверхностном слое материала; раз-

рушение поверхностей. Данные явления происходят не обязательно последовательно, могут чередоваться, переплетаться, взаимно влияя друг на друга.

Взаимодействие поверхностей делится на механическое и молекулярное. При механическом взаимодействии происходит внедрение, зацепление и соударение неровностей поверхности. Молекулярное взаимодействие проявляется в виде адгезии и схватывания. Схватыванию подвержены только металлические поверхности. Схватывание отличается от адгезии более прочными молекулярными связями.

Изменения, происходящие в поверхностном слое материала, как правило, вызываются деформацией, т. е. несовершенство структуры материала из-за многократных упругих деформаций приводит в определенных условиях к усталостному выкрашиванию или разрыхлению контактирующих поверхностей.

Разрушение поверхности является заключительным этапом пластической деформации по мере увеличения действующих силовых факторов. Изнашивание также в значительной мере зависит от температуры трущихся поверхностей и от химического действия рабочей среды.

Различают (рис. 11) изнашивание механическое, молекулярно-механическое и коррозионно-механическое.

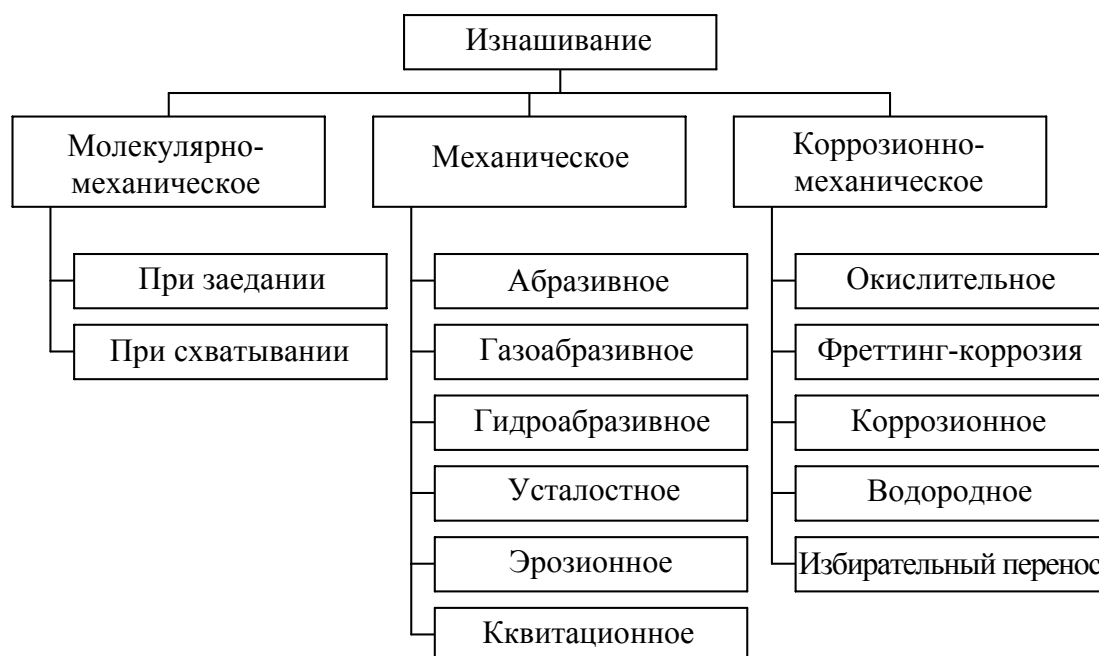


Рис. 11. Классификация видов изнашивания

Механическое изнашивание является результатом механических взаимодействий контактирующих поверхностей. Виды механического изнашивания:

1) **абразивное** – разрушение поверхности детали под воздействием твердых частиц. Этот вид изнашивания обладает большой интенсивностью. Происходит из-за некачественной фильтрации смазочного материала (неэффективная работа фильтров смазочной системы двигателей внутреннего сгорания (ДВС)), попадания абразивного материала из окружающей среды (нарушение герметичности воздушных впускных трубопроводов ДВС), работы деталей непосредственно в абразивной среде (шарнирные соединения гусениц трелевочного трактора).

2) **гидроабразивное** и **газоабразивное** – изнашивание происходит в результате воздействия твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа.

3) **усталостное** – изнашивание в результате многократного повторного деформирования микрообъемов материала, приводящего к возникновению трещин и отделению частиц. Отделение также может происходить и в результате наклепа поверхностного слоя, который становится хрупким и разрушается.

Выделяют контактную усталость и усталостное изнашивание. *Контактная усталость* является следствием качения без проскальзывания и проявляется в развитии местных очагов разрушения (питтинг). *Усталостное изнашивание*, как правило, наблюдается в случае трения скольжения и проявляется в отделении микрообъемов поверхности. Эти два вида разрушений одновременно наблюдаются у таких деталей, как зубчатые передачи, кулачки, оси качания коромысел газораспределительного механизма и т. д.

Усталость – процесс постепенного возникновения и развития трещин под влиянием многократных повторных знакопеременных силовых воздействий на металл.

4) **эрозионное** – изнашивание поверхности деталей происходит вследствие механического воздействия высокоскоростного потока жидкости, газа или пара.

Эрозионное изнашивание высокоскоростным потоком происходит из-за трения сплошного потока и его ударов о поверхность. Трение потока приводит к расшатыванию и вымыванию отдельных объемов материала, скорость изнашивания в этом случае достаточно мала. Наибольшее влияние на изнашивание оказывает динамическое воздействие потока (вырывы отдельных объемов или групп зерен). В результате потоки жидкости или газа внедряются в образовавшиеся

микротрещины и раздвигают боковые стенки; чем больше микротрещин, тем интенсивнее развивается эрозия. Если поток жидкости или газа содержит абразивные частицы, то изнашивание называется *эрозионно-абразивным* (пневмотранспортные установки).

Эрозионному изнашиванию подвержены поверхности золотников гидравлических агрегатов, компрессионные кольца ДВС и т. д. В свечах зажигания под действием электрических разрядов также происходит эрозионное изнашивание.

5) **кавитационное** – изнашивание в результате образования в движущемся потоке жидкости на поверхности твердого тела пустот в виде пузырей, наполненных парами, воздухом или газом, растворенным в жидкости или выделившимся из нее. При наличии сужений или препятствий на пути потока жидкости, движущегося с большой скоростью, давление внутри потока может упасть до величины, соответствующей давлению парообразования при данной температуре. В результате происходит разрыв потока, а образующаяся пустота заполняется паром или газами, выделившимися из жидкости. Пузырьки газа перемещаются вместе с потоком жидкости, попадают в области высоких давлений и пар конденсируется или газы растворяются в жидкости. В результате этого происходит восстановление сплошного потока, сопровождаемое резким ударом по поверхности, которая подвергается микроскопическим гидравлическим ударам, приводящим, в конце концов, к появлению трещин.

Явление кавитации присуще трубопроводам, гидромоторам, лопаткам центробежных гидронасосов. Кавитация помимо трещин на поверхности деталей вызывает вибрации, которые могут привести к расшатыванию крепежных соединений, обрыву болтов, смятию резьбы, нарушению уплотнений, а также к снижению КПД гидравлических машин.

Молекулярно-механическое изнашивание происходит в результате одновременного взаимодействия внешних механических и атомарных сил, которое приводит к образованию мостиков сварки, разрушаемых под действием тангенциальных сил. Молекулярно-механическое изнашивание проявляется в виде схватывания и заедания.

В результате взаимного трения или совместного деформирования при температуре ниже температуры рекристаллизации происходит соединение металла, т. е. **схватывание**, образуются прочные металлические связи в зонах непосредственного контакта поверхностей и происходит сращивание материалов трущихся поверхностей.

Заедание – одна из форм схватывания, характеризующаяся образованием широких и глубоких борозд с неровными краями, присутствием крупных наростов, оплавлением поверхности. Заедание приводит, как правило, к полному заклиниванию подвижных сопряжений.

Его подвид – изнашивание при заедании (схватывание, глубинное вырывание материала, перенос его с одной поверхности на другую). При коррозионно-механическом изнашивании имеет место одновременно пластическая деформация поверхностного слоя и его физико-химическое взаимодействие со средой (окислительное – образование пленок окислов, фреттинг-коррозия – присутствуют малые колебательные перемещения, когда окислы играют роль абразивных частиц).

Условием схватывания является разрушение на поверхности трения смазочной пленки (окислы, масло, жидкость или газ) под действием высокой температуры и (или) упругой деформации поверхностных слоев.

Коррозионно-механическое изнашивание возникает в результате химических процессов в материале неровностей вступающих в контакт поверхностей трения. Основными формами проявления коррозионно-механического изнашивания являются окислительное изнашивание и изнашивание при фреттинг-коррозии.

Окислительное изнашивание наблюдается в тех случаях, когда на соприкасающихся поверхностях образуются пленки оксидов, которые в процессе трения разрушаются и вновь образуются. Такой вид изнашивания происходит в отсутствие агрессивной среды при нормальных и повышенных температурах и трении без смазочного материала или его небольшом количестве. Наличие на поверхностях трения оксидов препятствует схватыванию.

Интенсивное окислительное изнашивание наблюдается при совместном действии температуры и вибрации. Температура приводит к росту оксидных пленок, а вибрация – к разрушению деталей, например, деталей крепления выхлопных коллекторов ДВС. Окислительному изнашиванию подвержены детали шарнирно-болтовых соединений, тяги и рычаги механизмов управления и т. д.

Фреттинг-коррозия – изнашивание, заключающееся в разрушении плотно контактирующих поверхностей пар металл – металл или металл – неметалл из-за малых колебательных перемещений с амплитудой от 0,025 мкм.

Результатом такого изнашивания является образование на соприкасающихся поверхностях мелких язвин и продуктов коррозии в виде налета, порошка и пятен.

Изнашивание при фреттинг-коррозии происходит следующим образом: при первом контакте детали соприкасаются только в отдельных точках поверхности (рис. 12, а). Вибрации при работе агрегата разрушают оксидные пленки, образуя небольшие каверны, которые заполняются оксидными пленками (рис. 12, б). Небольшие каверны постоянно увеличиваются в размерах и сливаются в одну большую каверну (рис. 12, в), в которой собираются продукты износа. Продукты износа не могут выйти из зоны контакта, в результате возникает высокое давление и образуются трещины, которые сливаются. Таким образом происходит откалывание материала [5].

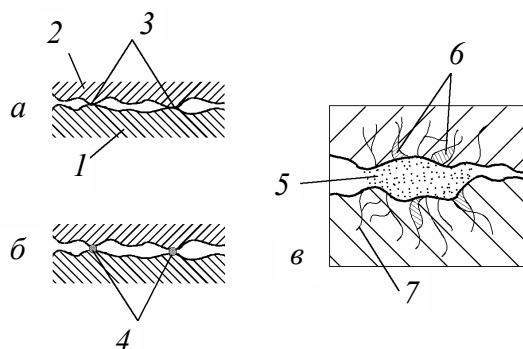


Рис. 12. Механизм изнашивания при фреттинг-коррозии:

- а – соприкосновение в отдельных точках поверхности;
 б – образование небольших каверн; в – образование общей большой каверны;
 1, 2 – трущиеся детали; 3 – точки контакта деталей; 4 – мелкие каверны;
 5 – общая большая каверна; 6 – отколовшиеся объемы материала; 7 – трещины

Фреттинг-коррозионному изнашиванию подвержены сопряженные поверхности валов и напрессованных на них дисков, колес, муфт и колец подшипников качения, запрессованные в картер вкладыши подшипников, поверхности шпонок и их пазы и т. д.

Коррозионное изнашивание наблюдается вследствие химического или электрохимического взаимодействия металлов с окружающей средой (часто агрессивной и при высоких температурах). При коррозии происходит равномерное или неравномерное растворение поверхности металла, уменьшающее его толщину.

Если металлические детали находятся под нагрузкой в коррозионной среде, то имеет место коррозионное растрескивание. При динамических нагружениях происходит коррозионно-усталостное разрушение.

Водородное изнашивание – процесс механического изнашивания ускоряется вследствие выделения водорода из материалов пар трения

или смазочных материалов, топлива, воды. Интенсивное выделение водорода при трении приводит к тому, что он поступает в поверхностный деформируемый слой металла, где накапливается, и при его определенной концентрации ускоряется процесс изнашивания. Такому виду изнашивания в лесозаготовительной промышленности подвержены инструменты и рабочие органы деревообрабатывающего оборудования.

Изнашивание при избирательном переносе – это явление трения с новым смазочным материалом при наличии в зоне контакта неокисляющейся пластичной металлической тонкой пленки, которая обладает особой структурой. Такая пленка способна к самовосстановлению при разрушении и называется «сервовитной» (лат. «спасать жизнь»). Сервовитная пленка образуется при трении, она состоит из металла (например, при контакте стали и бронзы образуется медная пленка, так как продуктом износа является медь) и препятствует непосредственному контакту металлических поверхностей и их схватыванию.

Изнашивание характеризуется следующими **количественными характеристиками**:

1. Скорость изнашивания (отношение величины износа ко времени, в течение которого возник износ).
2. Интенсивность изнашивания (отношение величины износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание).
3. Износостойкость (свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания).
4. Относительная износостойкость (отношение износостойкости испытываемого материала к материалу, принятому за эталон).

3.4. Закономерности изнашивания

Процесс изнашивания – сложный случайный процесс. До настоящего времени для него нет основного уравнения. В общем виде можно записать:

$$И = \int_0^t f(M, B, H, C) dt ,$$

где И – износ; М – характеристика материала; В – характер взаимодействия (род и вид трения, форма контакта, чистота поверхности и др.); Н – внешние нагрузки (давление, скорость и др.); С – характеристика рабочей среды (газовая среда и ее свойства, смазка и ее свойства, температура, давление и т. д.); t – время процесса изнашивания.

Для абразивного износа характерны следующие закономерности:

1. Величина износа прямо пропорциональна пути трения.
2. Скорость изнашивания прямо пропорциональна скорости трения и нагрузке:

$$\frac{dh}{dt} = cNv,$$

где h – величина износа; c – коэффициент пропорциональности; N – нормальная нагрузка.

3. Величина износа прямо пропорциональна величине N :

$$\frac{dh}{dS} = cN,$$

где S – длина пути скольжения.

При изменении соотношения твердости абразива и металла характер износа существенно меняется, при $H_m/H_a < 0,6$ (H_m , H_a – соответственно твердость металла и абразива) они зависят линейно.

Относительная износостойкость для технически чистых металлов в ненаклепанном состоянии и сталей в отожженном состоянии зависит от твердости материала. Для конструкционных углеродистых и легированных сталей зависимость другая.

3.5. Методы определения износа

Испытания на трение и износ проводят в 4 этапа:

- 1) лабораторные испытания физико-механических свойств материала;
- 2) лабораторные испытания для оценки влияния различных факторов на износ материалов;
- 3) стендовые испытания для оценки новых разработок;
- 4) натурные испытания для определения надежности работы механизмов или машин в целом.

Методы определения износа подразделяются на методы периодического определения износа и методы измерения износа в процессе испытаний без остановок машины.

Периодическое определение износа производится:

- 1) путем микрометрических измерений с точностью 0,01–0,001 мм (микрометры, микроскопы и т. д.);
- 2) по потере массы (взвешивание, точность $0,05 \cdot 10^{-6}$ г);
- 3) путем профилографирования (снятие профиллограмм);
- 4) методом искусственных баз (делают углубления и вычисляют расстояние от поверхности трения до дна углубления).

В процессе испытаний без остановки оборудования износ измеряют:

- 1) по содержанию продуктов износа в отработанном масле (в основном на стендах);
- 2) при помощи радиоактивных изотопов;
- 3) при помощи пневматического микрометрирования (измерение давления сжатого воздуха в цилиндре при изменении расстояния между выходным отверстием и поверхностью износа);
- 4) по расходу рабочей среды (измерение щели между трущимися парами пневматическим или жидкостным калибратором);
- 5) при помощи рычажных приспособлений и индикаторов часового типа (микронный индикатор устанавливается подвижно и с натягом);
- 6) индуктивными датчиками;
- 7) тензометрическим микрометрированием (деформация тензобалок).

3.6. Расчет деталей на износ

Для определения интенсивности износа I могут быть использованы выражения:

– для упругого контакта $I = 0,7 \frac{P_a}{En}$;

– для пластического контакта $I = \frac{0,07}{n} \sqrt{\frac{h_{\max}}{r}} \cdot \frac{P_a}{c\sigma_s}$,

где I – интенсивность износа; P_a – номинальное давление; E – модуль упругости; n – число циклов до разрушения; h_{\max} – максимальная высота неровностей трущейся поверхности; r – средний радиус кривизны вершин неровностей; c – коэффициент упрочнения металла; σ_s – предел текучести.

3.7. Определение износа машины

Износ машины в целом определяют аналитическим или графическим методом исходя из износа каждого элемента. При этом принимается во внимание общий фонд изнашивания элементов машины за полный срок ее службы.

При применении аналитического метода общий показатель износа машины (%) может быть определен по формуле

$$P_{\text{м.сум.х}} = \sum_{i=1}^s n_{ix} \left(\Delta_{im.a} \cdot 100 + \sum_{i=1}^s \Delta_{im}^k \cdot 100 \right) + \sum_{i=1}^s \left(\Delta_{im.a} \cdot P_{iax} + \sum_{i=1}^s \Delta_{im}^k \cdot P_{ix}^k \right),$$

где $\Delta_{im.a}$ и Δ_{im}^k – доли износа соответствующего элемента в общем фонде изнашивания любой машины за срок ее службы, относящиеся к активнодействующей его годности; S – число укрупненных элементов машины с исходной годностью; P_{iax} и P_{ix}^k – фактический частичный износ соответственно исходного и отремонтированного элементов машины, устанавливаемый по данным наблюдений.

Предлагается, что за срок службы укрупненные элементы машины сменяются или возобновляются $(n_i - 1)$ раз. Срок t_i они служат лишь при условии, что каждый из них периодически ремонтируют или частично возобновляют $(m_i - 1)$ раз.

Графический метод основан на построении и анализе графика суммированного износа машины, состоящей из элементов, сменяемых или полностью возобновляемых в разные сроки службы.

3.8. Разрушения и повреждения деталей и оборудования при отсутствии трения

Пластическое деформирование может проявляться при изгибе, скручивании, смятии. Эти разрушения и повреждения происходят под действием силовых (статических и динамических) и тепловых нагрузок, когда напряжения в материале превышают предел текучести или предел прочности (рамы тракторов, автомобилей, кузова, элементы манипуляторов и др.). В чугунных и стальных корпусных деталях (коробка передач, главная передача, блоки двигателя и др.) при воздействии внешних нагрузок, вибрации, нагрева наблюдаются процессы старения. В связи с этим происходит перераспределение внутренних напряжений, вследствие чего эти детали изгибаются, коробятся, разрушаются.

Пластической деформации подвергаются шейки валов под подшипники, места запрессовки, резьба, заклепки, шпонки и др. Это приводит к интенсивному изнашиванию сопряженных деталей.

Усталостные разрушения происходят в таких деталях, как коленчатые валы, рессоры, пружины, шатуны, работающие при знакопеременных нагрузках. Они разрушаются вследствие износа. Усталостная прочность снижается при несоблюдении радиусов перехода, наличии рисок, раковин и т. п.

Сущность **теплового разрушения** состоит в том, что под действием тепловых нагрузок происходят процессы изменения структуры металла (материала) и они теряют свои свойства (головки цилиндров, поршни, цилиндры и т. д.).

В деталях, которые подвержены искровым разрядам (свечи зажигания, контакты распределителя – прерывателя, реле регулятора и т. д.), происходит **электрокоррозионное разрушение**.

Для ряда деталей машин возможна **потеря приданных им служебных свойств**: например, потеря магнитных свойств ротора магнето, генераторов и других намагниченных деталей, потеря упругости рессор, подвески машин и др.

Химическая коррозия происходит при соприкосновении деталей с химически активными газами (газотрубопроводы и др.).

Электрохимическая коррозия имеет место при неоднородности деталей и попадании на них кислот, а также вследствие возникновения электролитического процесса.

Ряд деталей машин подвергается сочетанию коррозии, трения, ударов, переменных нагрузок и т. д. В этом случае происходят **комбинированные виды разрушений**.

4. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЛЕСНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

4.1. Вероятность безотказной работы по заданному критерию

При определении работоспособности деталей по критерию прочности, износостойкости, жесткости, теплостойкости, виброустойчивости расчетные параметры сопоставляют с предельными величинами – характеристиками прочности (предел текучести, прочности, выносливости), предельной нагрузкой, ресурсом, предельными перемещениями, теплостойкостью масла и материалов, динамической устойчивостью, а также по опытным данным (по результатам наблюдений в эксплуатации).

Условие безотказной работы:

$$Y \leq \frac{Y_{\text{lim}}}{n},$$

где Y – расчетное значение параметра; Y_{lim} – предельное значение параметра; n – коэффициент безопасности.

Расчет ведут либо по наиболее неблагоприятным условиям, либо используют вероятностные методы расчета. Y и Y_{lim} рассматривают как случайные величины, и показателем надежности является вероятность безотказной работы P по заданному критерию [6].

Вероятность P определяют по таблицам в зависимости от квантили:

$$U_p = -\frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{\bar{n}^2 v_{\text{lim}}^2 + v_y^2}},$$

где \bar{n} – коэффициент запаса прочности; v_{lim} и v_y – коэффициенты вариации.

Значения квантили нормированного нормального распределения U_p зависят от требуемой вероятности P (табл. 3).

Таблица 3

Квантили нормированного нормального распределения

P	0,50	0,90	0,95	0,99	0,999	0,9999
U_p	0,000	–1,282	–1,645	–2,326	–3,090	–3,719

4.2. Расчет по критерию прочности

При расчетах на сопротивление усталости нагруженность машины характеризуется спектрами нагрузок, которые могут быть дискретными или непрерывными.

Дискретные спектры представляют в виде зависимости нагрузки F от относительной продолжительности P ее действия или суммарной продолжительности ΣP_i от нагрузок в порядке их убывания (первая зависимость дифференциальная, вторая – интегральная).

При непрерывном спектре нагрузок задают функцию плотности распределения $f(F)$ или интегральную функцию

$$P(F) = \int_0^F f(F) dF.$$

На практике чаще используют графики, на которых нагрузка откладывается по оси ординат, а по оси абсцисс – функция $1 - P(F)$ (рис. 13). Эта функция означает долю продолжительности действия нагрузки, которая больше данной величины.

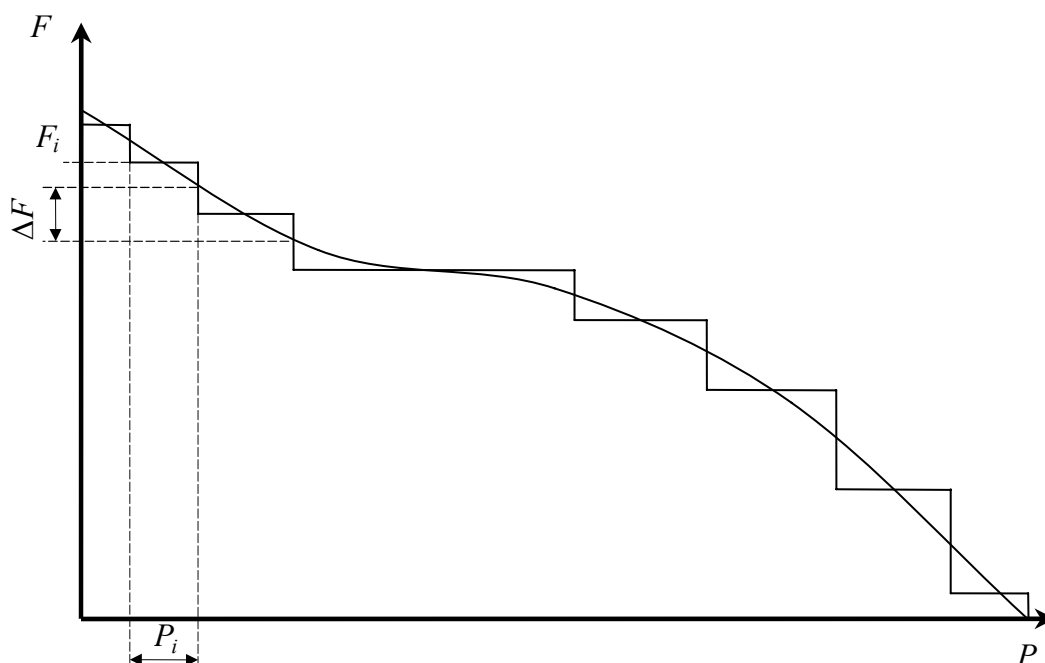


Рис. 13. Интегральный спектр нагрузок

В целях упрощения функции $f(F)$ и $(1 - P(F))$ заменяют ступенчатыми функциями с интервалом ΔF . Относительная продолжительность действия нагрузки F_i равна:

$$P_i = f(F_i) \Delta F.$$

Спектры нагрузок разнообразны, однако их можно свести к нескольким типовым, которые представляются в виде спектра относительных нагрузок, обычно выраженных в долях от максимальной.

Функции плотности $f(F/F_{\max})$ и интегральные функции $(1 - P(F/F_{\max}))$ спектров относительных нагрузок различны для тяжелого, легкого, особо легкого режимов (функция β -распределения), для равновероятного режима (функция равновероятного распределения); среднего нормального (функция нормального распределения) (рис. 14).

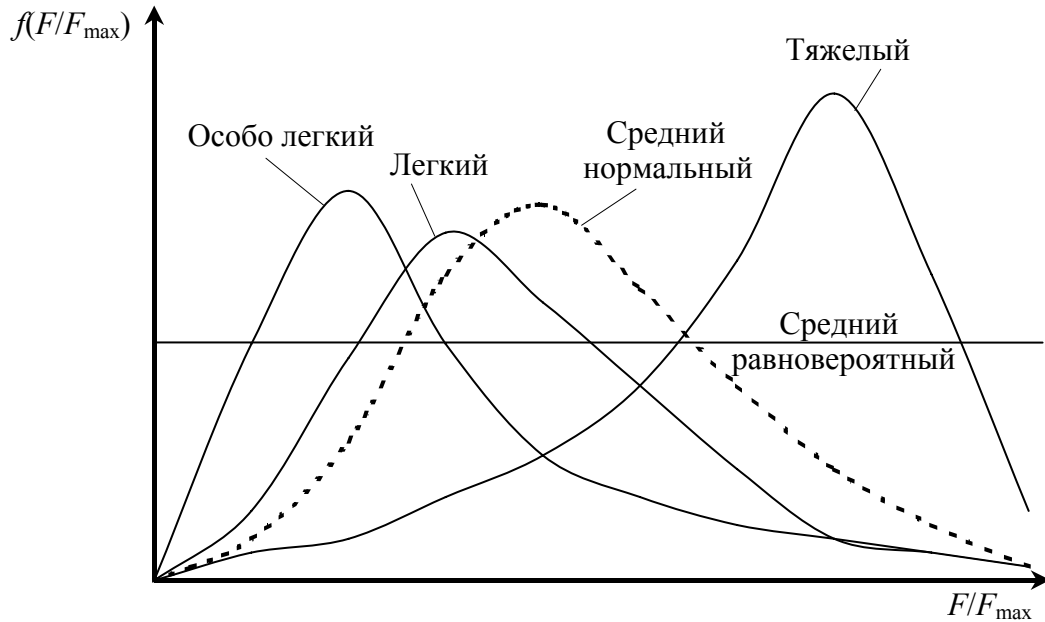


Рис. 14. Функция плотности спектров относительных нагрузок для типовых режимов

При переменных режимах спектры нагрузок удобно задавать начальными моментами μ_k k -го порядка, которые отражают свойства спектра и определяются по формулам:

$$\text{для дискретных спектров } \mu_k = \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i}{F_{\max}} \right)^k P_i;$$

$$\text{для непрерывных спектров } \mu_k = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{F_i}{F_{\max}} \right)^k f \left(\frac{F_i}{F_{\max}} \right) d \left(\frac{F_i}{F_{\max}} \right).$$

Известно, что начальный момент 1-го порядка равен среднему значению нагрузок, а 2-й начальный момент – дисперсии нагрузки.

При расчетах деталей и узлов машин на сопротивление усталости базируются на гипотезе линейного суммирования повреждений. При этом необходимо определить эквивалентную нагрузку и число циклов перемен напряжений, для чего используют коэффициент эквивалентности режима нагружения $K_{\text{реж}}$:

$$K_{\text{реж}} = \sqrt[k]{\mu_k} ,$$

где k – коэффициент, выбирается в зависимости от показателя степени m кривой усталости [7], которые для различных образцов и материалов приводятся в технической литературе (в зависимости от напряжений и от числа циклов). При напряжениях, пропорциональных нагрузке, $k = m$. При расчетах по контактным напряжениям, пропорциональным корню квадратному из нагрузки, $k = m/2$.

Значения начальных моментов μ_k определены для нагрузок типовых режимов нагружения. Например, для тяжелого при $k = 1$ $\mu_k = 0,772$; при $k = 6$ $\mu_k = 0,300$.

Максимальная нагрузка F_{max} и соответствующий начальный момент μ_k могут задаваться при расчетах на прочность.

Случайная природа нагрузок обусловлена целым комплексом факторов. Например, для транспортных машин:

- рассеяние режимов эксплуатации по нагрузке и скорости;
- рассеяние состояния дорог и подъездных путей;
- рассеяние частоты включения, торможения, квалификации водителя;
- рассеяние типов машин.

Влияет также внутренняя динамика машин (нагрузки от зубчатых передач, неуравновешенность деталей, перераспределение нагрузок и т. д.).

Нагрузка постоянного режима нагружения, эквивалентная по усталостному воздействию рассматриваемому переменному режиму, соответствует коэффициенту вариации эквивалентной нагрузки F :

$$F = F_{\text{max}} K_{\text{реж}} \sqrt[k]{\frac{N_{\Sigma}}{N_G}} \leq F_{\text{max}} ,$$

где F_{max} – максимальная нагрузка спектра; N_{Σ} – суммарное число циклов перемен напряжений за весь срок службы; N_G – число циклов до перелома кривой усталости.

Характеристику нагруженности отдельных деталей машин определяют пересчетом, а в наиболее ответственных случаях – непосредственно измерением действующих напряжений. В этом случае осциллограмму подвергают статистической обработке с целью схематизации процесса. Имеется в виду, что реальный процесс заменяется эквивалентным переменным режимом с синусоидальной формой цикла нагружения. При этом используют методы максимумов, экстремумов, размахов, полных циклов [6].

Схематизированный процесс нагружения представляют с помощью относительных напряжений:

$$\sigma_{\text{отн}} = \frac{\sigma_a}{\sigma_{\text{max}}},$$

где σ_a – расчетные текущие напряжения в произвольный момент времени; σ_{max} – максимальные значения напряжений.

4.3. Вероятность безотказной работы по критерию прочности

При расчетах по критерию прочности выбирают расчетное напряжение или нагрузку. Предельными величинами Y_{lim} являются пределы прочности, текучести, выносливости или несущая способность. В расчетах прочность определяют по соотношению расчетного напряжения σ_a и предельного по критерию прочности σ_d . Превышение предельного напряжения вызывает отказ. Значения $\bar{\sigma}_a$ и $\bar{\sigma}_d$ задают средними их значениями, среднеквадратичными отклонениями $S\sigma_a$ и $S\sigma_d$ и коэффициентами вариации v_a и v_d .

Вероятность безотказной работы или вероятность неразрушения P определяют по таблицам нормального распределения в зависимости от квантили:

$$U_p = -\frac{\bar{\sigma}_d - \bar{\sigma}_a}{\sqrt{S\sigma_d + S\sigma_a}} = -\frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{\bar{n}^2 v_d^2 + v_a^2}},$$

где \bar{n} – коэффициент запаса прочности по средним напряжениям:

$$\bar{n} = \frac{\bar{\sigma}_d}{\bar{\sigma}_a}.$$

Влияние концентратора напряжений учитывается при расчете местных напряжений умножением номинального напряжения на теоретический коэффициент концентрации, а также при определении предела выносливости.

При обычных расчетах переменность режима нагружений и срок службы учитывают при выборе допускаемого напряжения или при выборе эквивалентной нагрузки. В первом случае требуется предварительное определение эквивалентного числа циклов перемен напряжений. Учет производится умножением допускаемого напряжения на коэффициент долговечности K_L или делением максимальной нагрузки на этот коэффициент.

При линейной гипотезе суммирования усталостных напряжений [8]

$$K_L = \sqrt[m]{\frac{N_G}{N_e}} \geq 1,$$

где N_G – суммарное число циклов за весь срок службы; $N_e = k_{en}N_\Sigma$ – эквивалентное число циклов перемен напряжений; k_{en} – коэффициент эквивалентности циклов, равный начальному моменту k -го порядка спектра нагрузок ($k_{en} = \mu_k$); N_Σ – число циклов до перелома кривых усталости.

Коэффициент износа по средним напряжениям:

$$\bar{n} = \frac{\bar{\sigma}_R - \bar{K}_L}{\bar{\sigma}_{\max}},$$

где $\bar{\sigma}_R$ – среднее значение предела выносливости; \bar{K}_L – среднее значение коэффициента долговечности; $\bar{\sigma}_{\max}$ – среднее значение максимального напряжения.

Предельные напряжения определяют по эмпирическим зависимостям.

4.4. Теория подобия усталостного разрушения

Основной критерий – отношение L/G , которое принято как определитель возможности зарождения трещины, где L – периметр опасного сечения или его наиболее напряженной части; G – относительный градиент:

$$G = \frac{1}{\sigma_{1\max}} \cdot \frac{d\sigma_1}{dx},$$

где $\sigma_{1\max}$ – первое главное напряжение в наиболее напряженной точке периметра опасного сечения.

Для деталей круглого, прямоугольного сечений и т. д. при изгибе и других видах нагружения при наличии галтелей, выточек и т. п. имеются вполне определенные соотношения для L и G [7].

На основе этой теории получены выражения $\bar{\sigma}_d$ и v_d , которые достаточно точно описывают закономерности усталостного повреждения деталей разной геометрической формы:

$\bar{\sigma}_d = \varepsilon_\infty \bar{\sigma}_{-1} (1 + \chi)$ – медианное значение предела выносливости;

$v_d = \frac{(1 - 10^{2S})\chi}{2(1 + \chi)}$ – коэффициент вариации предела выносливости,

где параметр χ определяется по формуле

$$\chi = \frac{1 - \varepsilon_{\infty}}{\varepsilon_{\infty}} \left(\frac{1}{88,3} \cdot \frac{L}{G} \right)^{-v_{\sigma}}.$$

Сюда входят четыре параметра: $\bar{\sigma}_{-1}$ – медианное значение предела выносливости; v_{σ} – эмпирический коэффициент; ε_{∞} – коэффициент влияния абсолютных размеров; S – среднее квадратичное отклонение логарифма величины ($\sigma_d - U$), где U – минимальная граница σ_d . Значение коэффициента $L/G = 88,3$ соответствует гладкому образцу диаметром 7,5 мм.

При ориентировочных расчетах принимают $v_{\sigma} \approx 0,01$. Значения $\varepsilon_{\infty} = 0,5$ – для конструкционных сталей, деформируемых легких сплавов и модифицированных чугунов. Величина $S = 0,045-0,05$ – для конструкционных сталей, $S = 0,05-0,06$ – для алюминиевых и магниевых деформируемых сплавов.

Эта теория нашла применение для оценки усталостной прочности деталей транспортных средств различного назначения, которые при эксплуатации подвержены знакопеременным нагрузкам.

Существует метод двухпараметрического подобия усталостного разрушения. При этом используются лишь два экспериментальных параметра: медианное значение предела выносливости образца и коэффициент его вариации, в связи с чем сокращается объем испытаний. Этот метод также позволяет оценить надежность детали с несколькими концентраторами напряжений, разнесенными по длине [6].

4.5. Вероятность безотказной работы машин при различных видах соединения ее элементов

Надежность сложной технической системы, состоящей из отдельных элементов, зависит от показателей их надежности.

При совместных износных (вероятность $P_n(t)$) и внезапных (вероятность $P_v(t)$) отказах общая вероятность безотказной работы подсчитывается по теореме умножения вероятностей безотказной работы:

$$P(t) = P_n(t) \cdot P_v(t).$$

Если известны параметры законов распределения, то по этой формуле рассчитывается общая вероятность безотказной работы изделия.

Лесозаготовительное оборудование представляет собой сложную систему, состоящую из отдельных элементов, находящихся во взаи-

модействии. Существуют два основных вида соединения элементов: последовательное и параллельное.

Последовательное – такое, при котором отказ одного элемента влечет за собой отказ всей системы.

Параллельное – когда отказ всей системы возможен только при условии отказа каждой из параллельных ветвей.

Вероятность безотказной работы системы с **последовательным** соединением (рис. 15) равна произведению вероятностей безотказной работы элементов:

$$P_{\text{пос}}(t) = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i.$$

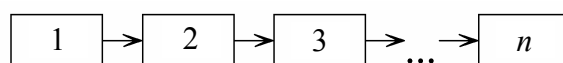


Рис. 15. Схема последовательного соединения элементов сложной системы

Если вероятность безотказной работы одинакова для всех элементов, то

$$P_{\text{пос}}(t) = P_i^n.$$

Если $P_i = 0,99$, то для системы, состоящей из 50 последовательно соединенных элементов,

$$P_{\text{пос}}(t) = (0,99)^{50} = 0,6.$$

Вероятность безотказной работы $P_{\text{пар}}$ при **параллельном** соединении элементов (рис. 16), когда резервные элементы постоянно присоединены к основным, может быть определена:

$$P_{\text{пар}}(t) = 1 - q(t),$$

где $q(t)$ – вероятность отказа всей системы.

В случае известной вероятности отказа каждого i -го элемента $q(t)$ может быть определена:

$$q(t) = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n = \prod_{i=1}^n q_i,$$

где q_1, q_2, \dots, q_n , – вероятности появления отказа каждого i -го элемента за время t .

Если вероятность отказа каждого из 3 элементов ($n = 3$) равна 0,1 ($q = 0,1$), то $P_{\text{пар}}(t) = 1 - (0,1)^3 = 0,999$.

В случае **ненагруженного резервирования** (с замещением резерва) (рис. 17) отключенные (резервные) элементы включаются только тогда, когда основное изделие отказывает. При известных количественных характеристиках надежности в составе парка машин можно рассчитать потребность в тех или иных узлах, которые необходимы для соблюдения нормативов на резервирование.

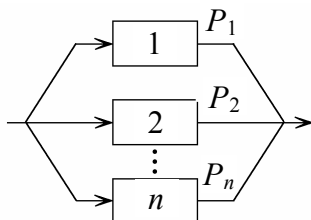


Рис. 16. Схема параллельного соединения элементов сложной системы

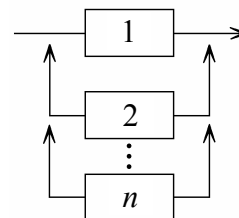


Рис. 17. Схема параллельного соединения элементов с замещением резерва

При **раздельном резервировании** надежность системы повышается, так как включается резервный элемент при отказе любого элемента (рис. 18).

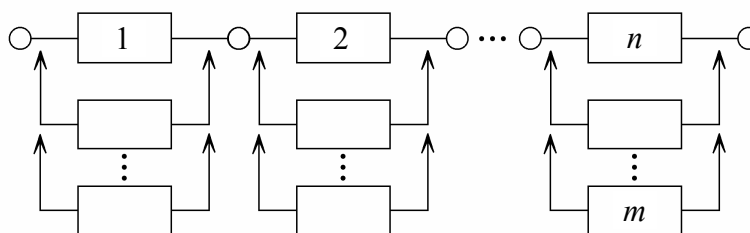


Рис. 18. Схема соединения элементов сложной системы с раздельным резервированием

При одинаковых элементах:

$$P_{\text{рез}}(t) = \left[1 - (1 - P_i)^m \right]^n.$$

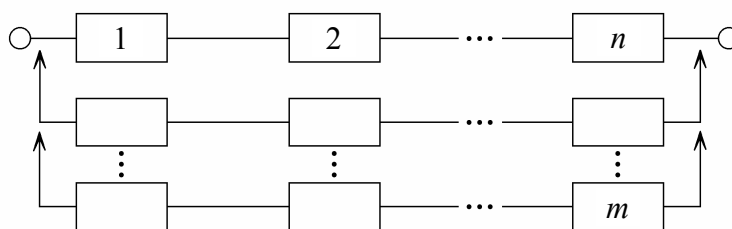


Рис. 19. Схема соединения элементов сложной системы с общим резервированием

При общем резервировании (рис. 19), т. е. когда при выходе из строя любого элемента включаются резервные элементы цепи, полностью заменяющие данную цепь, вероятность безотказной работы:

$$P_0(t) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_j),$$

где m – количество всех цепей; P_j – вероятность безотказной работы отдельной цепи.

4.6. Предельные состояния деталей, сопряжений и узлов машин по износу

Критерии износа устанавливают по степени их влияния на работу машины, исходя из условия невозможности ее дальнейшего функционирования, наступления периода аварийного износа или выхода характеристик оборудования за допустимые или рекомендуемые пределы.

При определении наработок T детали на основе использования известной закономерности изнашивания [7] учитывается величина предельного износа $I_{\text{пред}}$:

$$T = \frac{I_{\text{пред}}}{\gamma} \quad (\text{при } \gamma = \text{const}),$$

где γ – функция, характеризующая скорость изнашивания детали, является постоянной величиной для каждого характерного участка кривой изнашивания и определяется по выражению

$$\gamma = \frac{dI}{dt}.$$

Необходимо выполнение условия $I_{\text{доп}} < I_{\text{пред}}$, так как деталь не должна выйти из строя в течение последующей межремонтной наработки T_1 , за которую износ составит γT_1 . Тогда

$$I_{\text{доп}} + \gamma T_1 = I_{\text{пред}}.$$

Так как $\gamma = \frac{I_{\text{доп}}}{T_p}$ (где T_p – общая наработка до ремонта, до начала эксплуатации), $I_{\text{доп}}$ – допустимый износ, то

$$I_{\text{доп}} + \frac{I_{\text{доп}}}{T_p} T_1 = I_{\text{пред}},$$

откуда

$$I_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{пред}}}{1 + \frac{T_1}{T_p}}.$$

Можно записать зависимость $T_p = KT_1$, где K – число межремонтных циклов до предельного состояния объекта, определяемое по нормативной литературе. В этом случае $I_{\text{доп}}$ будет:

$$I_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{пред}}}{1 + \frac{T_1}{KT_1}} = \frac{K}{1 + K} \cdot I_{\text{пред}}.$$

Зная $I_{\text{пред}}$, можно определить наработку T_p деталей, заменяемых при периодических ремонтах, для чего сделаем подстановку в формулу $I_{\text{доп}} = \gamma T_p$. Тогда получим, что

$$T_p = \frac{K}{1 + K} \cdot \frac{I_{\text{пред}}}{\gamma}.$$

4.7. Оптимальная долговечность

Под оптимальной долговечностью техники понимают наиболее экономически эффективный срок ее использования до замены с учетом оптимального обслуживания ее ремонтом.

Определение оптимальной долговечности основано на обосновании оптимального срока службы, при котором будут минимальные затраты и потери на единицу продукции или выполненной работы.

Удельные затраты и потери, связанные с использованием машины, отнесенные на единицу выполненной работы:

$$c_{\text{уд}} = \frac{c_{\text{об}}}{t} = \frac{c_{\text{м}}}{t} + c + kt^{\delta-1},$$

где $c_{\text{об}}$ – общие (суммарные) затраты и потери потребителей, связанные с использованием машины; t – время работы машины; $c_{\text{м}}$ – затраты на приобретение машины (за вычетом реализации последующих ее остатков); c – затраты и потери на хранение, топливо и рабочую силу; k – постоянный для данного объекта коэффициент, определяющий исходную норму прогрессирующих затрат и потерь потребителя; δ – показатель степени роста затрат и потерь по мере старения объекта.

При расчете оптимального срока службы машины учитываются удельные затраты и потери, связанные с ее эксплуатацией.

Оптимальный срок службы машины может быть определен по следующей зависимости:

$$T_{\text{опт}} = \sqrt[k]{\frac{c_{\text{м}}}{(\delta - 1)^k}}.$$

Как следует из последнего соотношения, $T_{\text{опт}}$ зависит от $c_{\text{м}}$, постоянного коэффициента k , который учитывает затраты на поддержание машины в работоспособном состоянии, и показателя δ .

Оптимальная долговечность парка машин определяется по формуле

$$T_{\text{опт}}^{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^k N_i T_{\text{опт}}^i}{\sum_{i=1}^k N_i},$$

где k – число групп машин; N_i – число машин в i -й группе; $T_{\text{опт}}^i$ – оптимальная долговечность каждой из i -х групп. Оптимальная долговечность парка машин является средним из оптимальных долговечностей групп машин.

5. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

5.1. Классификация методов испытаний

Испытания оборудования на надежность производятся для оценки фактического уровня его надежности. В результате получают данные о способности машины или оборудования выполнять заданные функции, а также данные для определения возможностей их использования в эксплуатации.

Накопление таких данных позволяет повысить эффективность проводимых конструкторских, технологических и эксплуатационных мероприятий.

Испытания на надежность требуют больших затрат времени, так как на протяжении длительного срока службы машины происходит рассеивание данных из-за различных условий эксплуатации, нагрузочных режимов и др.

Объектами испытаний надежности на различных этапах жизненного цикла машины (проектирование, эксплуатация, ремонт) являются:

- 1) образцы из различных материалов (для испытаний на износостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость и др.);
- 2) сопряжения и кинематические пары (подшипники, зубчатые колеса, муфты сцепления и др.);
- 3) узлы машин (коробки передач, задние мосты и т. д.);
- 4) машины (стендовые и эксплуатационные испытания опытных образцов);
- 5) системы машин (для определения показателей надежности во взаимодействиях отдельных машин).

На рис. 20 приведена классификация методов испытаний.

В первую очередь при испытаниях получают данные о распределении отказов и наработке.

По типу распределений отказов производятся: испытания на внезапные (аварийные) отказы; испытания на износные (постепенные) отказы; комплексные испытания – учитываются все виды отказов (при создании и доводке новых моделей машин).

При внезапных отказах испытанию подвергают одновременно *n* изделий без замены вышедших из строя, т. е. число изделий постепенно уменьшается. При этом определяют наработку каждого изделия или долю отказавших изделий. Испытания могут также производиться по варианту, когда заменяются изделия, вышедшие из строя.

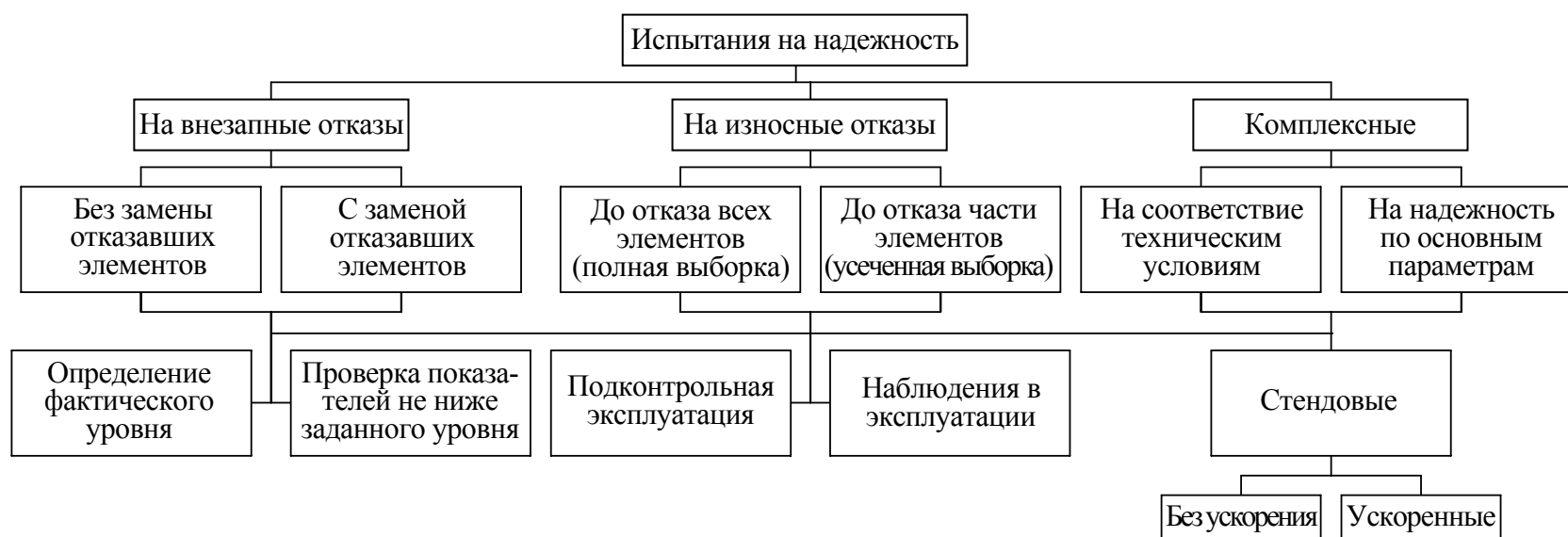


Рис. 20. Классификация методов испытаний

Среднее время отказов \bar{x} за время испытаний равно:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^r x_i + (N-r)t}{N},$$

где $\sum_{i=1}^r x_i + (N-r)t$ – сумма наработки всех деталей за период t , как отказавших, так и неотказавших; x_1, x_2, \dots, x_n – время безотказной работы каждого из r отказавших изделий; N – число изделий в работе; t – время испытания; r – число отказавших изделий.

При оценке параметров износных отказов, когда испытания ведутся до отказа всех n изделий (элементов) при нормальном законе их распределения, математическое ожидание \bar{x} и среднее квадратичное отклонение σ_T времени работы без износных отказов равны:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N};$$

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2}{N-1}},$$

где x_i – время работы без износных отказов i -го изделия.

Одним из основных видов испытаний машин на надежность является *оценка скорости изменения ее основных параметров с течением времени*. Основные оцениваемые при этом параметры: точность выполнения служебных функций, производительность, КПД, мощность, скорость движения, расход топлива, качество работы и т. д. Испытания машин на соответствие техническим требованиям дают определенную информацию и о надежности, хотя главная их цель иная – получение данных по недолговечным элементам, близость параметров к предельным их значениям и др.

Главная цель испытаний новых машин состоит в определении фактического уровня надежности. При проведении контрольных (в основном после ремонта) испытаний ставится цель убедиться, что фактический уровень надежности не ниже предельно допускаемого.

5.2. Планирование объема испытаний

При испытаниях определяют время работы и число испытываемых объектов, необходимое для обеспечения соответствующей достоверности

данных. При оценке машины в целом план испытаний строят так, чтобы с заданной точностью определить ее коэффициент готовности. Наработка на отказ с заданной степенью точности определяется в случае определения только показателей безотказности машины.

Принято, что полные испытания неремонтируемого изделия закончены, когда вероятность его безотказной работы $P(t_u) = 0,1$. Например, для нормального закона:

$$P(t_u) = \frac{T - t_u}{\sigma_T} = 0,1,$$

где T – среднее время безотказной работы; t_u – время испытаний.

Откуда

$$t_u = T - U_{01}\sigma_T = T + U_{09}\sigma_T = T + 1,28\sigma_T = T(1 + 1,28v_t),$$

где U_{01} – квантиль при вероятности 0,1; v_t – коэффициент вариации времени безотказной работы:

$$U_{01} = \frac{T - t_u}{\sigma_T}; \quad v_t = \frac{\sigma_T}{T_{cp}}.$$

Число объектов испытаний для неремонтируемых изделий равно:

$$N_{Tcp} = \frac{t_B^2 v_t^2}{\Delta_T^2},$$

где t_B – время восстановления; Δ_T – точности наработки на отказ.

Для ремонтируемых изделий:

$$N_p = \frac{t_B^2 (1 - P)}{\Delta_p^2 P},$$

где P – вероятность безотказной работы; Δ_p – степень точности вероятности безотказной работы.

Значения Δ_T и Δ_p выбираются по справочной литературе из определенных на основании аналогичных проведенных испытаний.

Среднее число отказов:

$$n_{от} = \frac{t_B^2 v_t^2}{\Delta_{Tcp}^2} = \frac{t_B^2 (v_B^2 + v_t^2)}{\varepsilon_\eta^2},$$

где v_B – коэффициент вариации времен восстановления; ε_η – относительная погрешность.

5.3. Ускоренные испытания на надежность

Учитывая длительное время испытаний на надежность, для снижения материальных и временных затрат большое значение имеют различные методы ускорения испытаний.

Коэффициент ускорения испытаний:

$$K_y = \frac{T_n}{T_\phi},$$

где T_n и T_ϕ – время безотказной работы при нормальных условиях и фактическое время проведения ускоренных испытаний.

Применяют следующие методы ускоренных испытаний.

1. Усиление режима работы. Производится за счет увеличения скоростей, нагрузок, температур, применения агрессивных сред и т. п. Следует иметь в виду, что предельные значения факторов должны быть такими, чтобы не искажалась физическая сущность явлений разрушений.

Коэффициент ускорения K_y , например, при линейной зависимости износа от нагрузки P определяется по выражению

$$K_y = \frac{P_{\max} v_{\max}}{P_{\text{ср}} v_{\text{ср}}},$$

где P_{\max} и $P_{\text{ср}}$ – максимальное и среднее значения нагрузок; v_{\max} и $v_{\text{ср}}$ – максимальное и среднее значения скоростей износа.

2. Сокращение простоев и холостых ходов. При данном методе необходимо, чтобы длительность простоев и холостых ходов была минимально допустимой. При отсутствии холостых ходов T_x и непрерывной работе T_p

$$K_y = \frac{T_p + T_x}{T_p}.$$

3. Повышение точности измерения параметра. Если повысить точность измерения (например, износа), то по характеру процесса можно установить за короткий срок ход процесса полностью. Предельная погрешность метода измерения:

$$\Delta_{\text{lim}} = 0,4 d_n \frac{\bar{n} v_u}{m} \sqrt{q},$$

где d_n – коэффициент размаха, зависящий от объема выборки; v_u – коэффициент вариации; m – число интервалов диапазона размаха выборки; q – число повторных измерений.

4. Применение условных полей допусков. Условный отказ может быть зафиксирован и в процессе изготовления объекта как следствие выхода обрабатываемого размера за пределы установленного допуска:

$$K_y = \frac{\delta}{\delta_y},$$

где δ – величина фактического допуска; δ_y – условный установленный допуск.

5. Использование сопряженных распределений. Если известна связь показателей надежности с теми параметрами машины, которые ее определяют, то можно сократить время испытаний.

Так, в случае, если два распределения будут сопряженными, (т. е. одно определяет другое), то вместо функции распределения времени безотказной работы $P_T(t)$ можно исследовать кривую распределения выходных параметров машины $P_X(t)$ и ее изменение во времени. При этом можно получить две эквивалентные формулы для вероятности безотказной работы $P_T(t)$, в одну из которых входят матожидание и среднее квадратичное значение времени безотказной работы, а в другую – статистические показатели выходных параметров машины. Последние оцениваются при испытаниях гораздо быстрее. При этом удастся прогнозировать надежность при достаточно непродолжительных испытаниях.

6. Использование закономерностей отказов. Время испытаний может быть сокращено до минимума, если теоретически или экспериментально выявлена причина отказов и установлены закономерности, связывающие интенсивность процессов изнашивания с физическими параметрами, определяющими конструктивные особенности и режимы эксплуатации.

Например, известно, что скорость абразивного изнашивания линейно зависит от твердости материала, удельного давления, скорости скольжения и т. п. Установлены также средние значения и дисперсия этих величин. В этом случае быстро можно найти скорость изнашивания, а зная ее, легко определить и безотказность.

5.4. Техническая диагностика машин

Проведение технических обслуживаний включает индивидуальный контроль состояния отдельных агрегатов, узлов и машины в целом, которые не требуют разборки. Это позволяет заблаговременно выявить скрытые неисправности и определить перечень профилактических и ремонтных работ.

С точки зрения надежности диагностика – это возможность установления состояния машины, в которое она перейдет после определенного времени работы.

В теории надежности машин рассматривается 3 метода прогнозирования отказов:

- 1) статистический;
- 2) индивидуальных измерений;
- 3) граничных испытаний.

В последнем случае прогнозирующие параметры машины определяются при работе в особо сложных (утяжеленных) режимах. При этом находятся слабые элементы и скрытые дефекты, которые в процессе эксплуатации могут привести к внезапным отказам.

6. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЛЕСНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

6.1. Общие направления повышения надежности

Существуют следующие направления по обеспечению высокой надежности машин и оборудования:

- 1) обеспечение высокого технического уровня изделий;
- 2) применение агрегатов и деталей с высокой надежностью и долговечностью;
- 3) применение деталей и узлов, самоподдерживающих работоспособность (самосмазывание, самоустанавливание и т. д.);
- 4) применение жестко регламентируемой технологии.

6.2. Особенности обеспечения надежности лесопромышленного оборудования

В тракторном, автомобильном и лесном машиностроении осуществлен целый комплекс конструкторско-технологических мероприятий по повышению безотказности и долговечности изделий. Несмотря на это, надежность технологического оборудования, базовых тракторов и автопоездов еще невелика, не полностью решаются вопросы ремонтпригодности и сохраняемости. Например, межремонтные сроки службы тракторов после ремонта составляют всего 40–60% срока службы новых тракторов.

Повреждения и отказы автомобилей можно объединить в следующие группы:

- 1) повреждения усталостного характера;
- 2) износ валов, втулок и т. д.;
- 3) повреждения резинотехнических изделий;
- 4) неисправности вследствие нарушения регулировок;
- 5) перетирание;
- 6) прогорание прокладок, газопроводов;
- 7) течь масла;
- 8) прочие неисправности.

В процентном отношении повреждения и неисправности по группам составляют, например, для автомобиля ЗИЛ-131:

1 – 44%; 2 – 9%; 3 – 22%; 4 – 1%; 5 – 2%; 6 – 1%; 7 – 1%; 8 – 20%.

Распределение повреждений и неисправностей для автомобилей других марок, а также тракторов может несколько изменяться в зависимости от их типа, характера использования, условий эксплуатации.

Детали базовых автомобилей и тракторов с точки зрения назначения их ресурса можно подразделить в зависимости от экономических и социальных последствий выхода их из строя. Например, для автомобилей их делят:

1) на детали, ресурс которых невозможно или экономически нецелесообразно создавать равным пробегу до капитального ремонта (фрикционные накладки, фильтры, сальники и т. д.);

2) детали, внезапный выход из строя которых не влияет на безопасность движения (шестерни, валы коробки передач, подшипники), однако их ресурс определяет значение общего ресурса машины до капремонта; к ним также относятся детали шасси, которые не угрожают безопасности движения – по их ресурсу производится списание машины;

3) детали, выход из строя которых угрожает безопасности движения (рулевое управление, тормоза и т. д.), их ресурс превышает ресурс до полного списания.

Особую важность представляет собой обеспечение надежности деталей, выход из строя которых угрожает безопасности движения.

Например, для тормозных пневматических систем автомобилей большой грузоподъемности детали, лимитирующие надежность тормозов, имеют большое рассеивание ресурса (30–250 тыс. км), коэффициент вариации изменяется в пределах 0,34–1,0. На долю неметаллических деталей приходится наименьший ресурс (например, резиновая диафрагма). Для этих деталей высший коэффициент вариации 0,9–1,0, а в этом случае эффективность диагностики мала. Здесь эффективным будет резервирование.

Примером резервирования может служить установка на автомобиле параллельно 3 тормозных систем: основной, дополнительной и аварийной.

При анализе надежности двух трелевочных машин МЛ-127 в условиях Республики Коми после наработки 713 мото-ч было зафиксировано 9 отказов, т. е. в среднем по 4,5 отказа на машину. В результате испытаний на надежность были выявлены недостатки, лимитирующие надежность. По гидросистеме – течи масла по штоковому уплотнителю гидроцилиндра поворота; деформация и выход из строя штока гидроцилиндра толкателя. По технологическому оборудованию – поломка кронштейна защитно-опорного щита; отрыв нижних кронштейнов защитно-опорного щита. По трансмиссии – скручивание и срез вала привода заднего моста по шлицу; выход из строя из-за износа шестерни заднего хода; излом штока перемещения шестерни заднего хода.

В процессе испытаний также были выявлены следующие недостатки:

- ослабление затяжки болтов крепления конечных передач к корпусу переднего моста (что в конечном итоге приводило к течи масла по стыкам приварочных плоскостей рукавов конечных передач) и несвоевременная подтяжка болтов могут привести к трудноустраняемым поломкам переднего моста;

- недостаточная жесткость нижних ограждений и их деформация при наезде на пни;

- деформация и обрыв подножек;

- недостаточная прочность и долговечность лонжеронов задней полурамы;

- недостаточно надежная фиксация рычага переключения передач.

Установлено, что одной из причин, вызывающих отказы, является недостаточная прочность деталей. Более половины отказов по технологическому оборудованию и гидросистеме произошли из-за поломок и трещин.

Анализ неисправностей гидравлической системы показал, что нарушение ее работы происходит из-за нарушения герметичности соединений (искривление штоков гидроцилиндров, износ уплотнений), усталостных явлений, применения некачественного материала.

Лесозаготовительное оборудование подвержено действию значительных динамических нагрузок: вибрации, пульсации давления жидкости в системе, гидравлических ударов, возникающих в моменты включения и отключения гидроагрегатов, колебаний давления в процессе рабочих операции с деревьями. Кроме того, ряд нагрузок усиливается повышением температуры, влиянием монтажных напряжений.

Для примера в табл. 4 приведены данные по изменению давления в гидроцилиндре захвата трелевочной машины при укладке дерева в коник (разжатие захватов).

Таблица 4

Значения давлений в гидроцилиндре захвата при укладке дерева в коник

Диаметр дерева, см	Вылет мани- пулятора, м	Бесштоковая полость		Штоковая полость	
		P_{\max} , МПа	P_{\min} , МПа	P_{\max} , МПа	P_{\min} , МПа
16	7,3	3,0	1,5	6,4	2,1
18	6,2	2,8	1,8	5,0	1,4
24	6,7	3,1	2,5	4,3	2,3
24	5,7	3,4	1,7	5,5	2,6
34	5,0	3,5	1,8	5,8	2,4
36	6,4	5,4	3,6	–	–

В процессе работы с деревьями изменение нагрузок и давления жидкости в гидросистеме носит знакопеременный характер с частотой до 50 Гц. Имеют место гидроудары с «выбросами» давления до 19 МПа. Знакопеременные динамические нагрузки в гидросистеме являются одним из главных факторов, вызывающих усталостные разрушения и образование трещин в технологическом оборудовании.

Рабочий процесс набора воста деревьев на трактор проходит в условиях переменных нагрузок, требует внимания оператора и частых воздействий на органы управления, перехода от одной операции цикла к другой. Из-за нарушений технологии разработки лесосеки возможно использование машины для растаскивания завалов, что связано с большими динамическими перегрузками.

6.3. Мероприятия по обеспечению надежности

Обеспечение надежности производится комплексом конструктивных технологических, эксплуатационных и ремонтных мероприятий.

Повышение надежности деталей и узлов, отказывающих из-за усталостных повреждений или износа, производится за счет повышения их несущей способности и износостойкости (применение соответствующих материалов и оптимальных технологий обработки, покрытий, биметаллических подшипников и т. д.).

Такие мероприятия в равной мере свойственны для автомобилей, тракторов, лесотехнологического оборудования различного типа и назначения.

К числу *конструктивных мероприятий* по обеспечению повышенной надежности относятся:

- 1) выбор долговечных материалов деталей и рациональное их сочетание в парах трения;
- 2) обеспечение нормальных условий работы деталей при наименьших потерях на трение;
- 3) создание оптимальных температурных режимов работы сопряжений деталей, узлов и агрегатов;
- 4) обеспечение хороших условий смазки трущихся поверхностей деталей;
- 5) создание эффективных устройств для очистки воздуха, топлива, смазки;
- 6) улучшение конструкции и материалов уплотнительных устройств и герметизация узлов и агрегатов;
- 7) обеспечение достаточной жесткости базовых деталей машин и устойчивости их к вибрации;

8) другие мероприятия (применение узлов демпфирования двойных силовых пружин муфт сцепления, гидравлическое натяжение гусениц и т. д.).

К числу **технологических мероприятий** следует отнести:

1) обеспечение необходимой точности и качества изготовления деталей;

2) достижение высоких геометрических характеристик качества поверхностей;

3) применение упрочнения деталей и их рабочих поверхностей термической и химико-термической обработками;

4) упрочнение деталей поверхностным пластическим деформированием;

5) нанесение на поверхности деталей износостойких и антикоррозионных покрытий;

6) другие мероприятия (термохимическое упрочнение, армирование деталей, окраска и др.).

Эксплуатационные мероприятия:

1) обкатка новых машин;

2) организация техобслуживания и создание для этого необходимой базы;

3) проведение периодических технических осмотров и диагностирования состояния машин;

4) обеспечение нормального режима работы машин;

5) соблюдение правил хранения машин в нерабочее время;

6) соблюдение рекомендаций заводов-изготовителей по применению топлив, масел и смазок;

7) контроль и постоянное соблюдение герметизации агрегатов, узлов и систем машин;

8) другие мероприятия (повышение квалификации кадров, улучшение организации работ и др.).

Ремонтные мероприятия:

1) обеспечение сохранности ремонтного фонда, поступающего на ремонтные предприятия;

2) выполнение разборочных работ при условиях, исключающих повреждение деталей и разукладку пар;

3) эффективная мойка и очистка деталей;

4) контроль и дефектация изношенных деталей машин;

5) сплошной контроль размеров и геометрии рабочих поверхностей базовых деталей машин, поступающих в ремонт, а также точности их взаимного расположения;

- 6) весовой и размерный подбор деталей цилиндропоршневой группы (для двигателя внутреннего сгорания);
- 7) динамическая балансировка вращающихся деталей;
- 8) обеспечение регламентированных посадок, усилий затяжки и оборки резьбовых соединений;
- 9) обеспечение герметизации узлов и агрегатов при ремонте;
- 10) стендовая обкатка и испытания;
- 11) качественная окраска ремонтируемых машин и оборудования.

Для повышения долговечности восстанавливаемых деталей машин используют различные методы. Широкое распространение получило восстановление наплавкой: наплавка в среде газа; наплавка в газовой среде на основе аргона; наплавка порошковыми проволоками; наплавка под легированными керамическими флюсами; плазменная наплавка; индукционная наплавка.

В практике предприятий применяется восстановление сваркой, а также наплавкой и сваркой.

Повышение долговечности и прочности в этом случае обеспечивается следующими приемами: поверхностная закалка с нагревом токами высокой частоты, газовым пламенем или плазменной дугой; поверхностное пластическое деформирование; электромеханическая обработка; химико-термическая обработка; термомеханическая обработка, проводимая в процессе наплавки.

Дают хорошие результаты восстановление и упрочнение деталей гальваническими покрытиями; восстановление полимерными материалами. Применяют также электроконтактную наплавку, электроимпульсное наращивание, электроискровое наращивание, армирование твердыми сплавами, заливку жидким металлом.

6.4. Разработка программы обеспечения надежности (ПОН)

Программа обеспечения надежности (ПОН) является весьма важным документом, разрабатываемым на стадии «техническое предложение» и отражающим суть системного подхода к обеспечению одного из главных компонентов качества – надежности машины. ПОН – документ, рассматривающий совокупность взаимосвязанных требований, организационно-технических мероприятий и правил принятия решений, обуславливающих достижение заданного уровня надежности.

ПОН нового изделия охватывает все стадии разработки, начиная от стадии «Техническое предложение» и заканчивая стадией «Государственные испытания», при этом ПОН может разрабатываться в виде единого документа или в виде отдельных документов на стадии

разработки (ПОНр), производства (ПОНп) и эксплуатации (ПОНэ или ППН – программы поддержания надежности). Обычно ПОН имеет единую для отрасли типовую структуру, включающую следующие разделы.

Раздел 1 «Общие положения» содержит:

а) исходные данные для разработки ПОН, включающие основные сведения по назначению и структуре системы (изделия), эксплуатационно-технические характеристики системы, номенклатуру и количественные значения показателей надежности, а также организационно-технические требования по обеспечению надежности; пути обеспечения надежности изделий, условия эксплуатации системы, совокупность внешних воздействующих факторов; порядок применения, хранения, обслуживания системы и ее элементов;

б) перечень ПОН изделий более низких уровней структуры системы (агрегатов) с указанием количественных и организационно-технических требований, предъявляемых к их надежности;

в) перечень научно-технических проблем надежности, которые должны быть решены при создании системы и ее изделий.

Раздел 2 «Работы и мероприятия по обеспечению надежности» составляют в виде таблиц. В него включают перечень работ и мероприятий по обеспечению надежности с развертыванием их по стадиям жизненного цикла системы; исполнителей работ, ссылки на нормативно-технические, методические и отчетные документы. Так, на этапах *технического задания, технического предложения, эскизного проекта* предусматриваются следующие мероприятия:

- сбор и анализ информации о надежности аналогов, их составных частей, комплектующих элементов;

- определение критериев отказов, выбор номенклатуры и норм показателей надежности, распределение (задание) норм надежности на составные части, подсистемы, комплексы, сборочные единицы, узлы, детали, комплектующие изделия;

- выбор материалов и комплектующих элементов;

- разработка предложений по обеспечению надежности составных частей и защита изделия от различных перегрузочных режимов, а также предложения по обеспечению безопасности. Здесь же может быть приведена предварительная оценка надежности выбранного варианта конструкции, которая уточняется по мере получения дополнительной информации, а также аналогичная оценка надежности составных частей, технологических процессов, определение норм запасных частей, планов испытаний, допустимых нагрузок и допусков, ограни-

чений на комплектующие элементы, детали, технологические операции, разработка методик испытаний всех видов.

На этапе технического проекта: уточнение всех расчетов, сделанных ранее в эскизном проекте с учетом принятых решений, результатов исследования и испытаний макетов, образцов, комплектующих изделий, элементов конструкции и других уточняющих данных по надежности составных частей; анализ причины отказов, обнаруженных при испытаниях макетов, уточнение критериев отказов и предельных состояний.

На этапе разработки конструкторской документации: внесение требований по надежности в конструкторскую документацию, разработка методов оценки надежности по результатам испытаний, разработка программы и методики испытаний по надежности, анализ возможностей повышения надежности путем унификации и стандартизации комплектующих элементов, разработка конструкторской документации на консервацию, упаковку и транспортирование изделий, расчет ЗИП, разработка эксплуатационной и ремонтной документации, корректировка конструкторской документации по результатам испытаний.

На этапе изготовления изделия: оценка готовности предприятия к выпуску продукции с требуемым уровнем надежности; аттестация технологических процессов, анализ возможностей повышения надежности за счет автоматизации технологических процессов, повышения их точности и стабильности, организации входного и выходного контроля, различных видов испытаний деталей, узлов и агрегатов (контрольных, ускоренных эксплуатационных, технологических процессов и обкатки и т. д.), разработка и соблюдение правил консервации и упаковки перед транспортировкой.

На этапе эксплуатации изделий: организация сбора и обработки информации о надежности при эксплуатации, анализ причин отказов и разработка мероприятий по их устранению, анализ эффективности системы технического обслуживания и ремонта, оценка достаточности ЗИП, внедрение средств технической диагностики, промышленных методов ремонта, контроль мероприятий по соблюдению правил и режимов эксплуатации, доработка инструкций по эксплуатации, обучение обслуживающего персонала и т. д.

Раздел 3 «Методическое обеспечение» включает полный перечень руководящих, нормативно-технических и методических документов, которыми необходимо руководствоваться при выполнении работ и мероприятий, предусмотренных в разделе 2.

В разделе 4 «Порядок контроля выполнения и корректировки ПОН» устанавливают контрольные сроки выполнения пунктов ПОН и порядок возможных корректировок.

Разработкой ПОН занимается подразделение главного конструктора изделия с участием подразделений главного технолога, отделов надежности, стандартизации, ОТК и других заинтересованных подразделений. ПОН утверждается руководителем предприятия.

Для изделий, находящихся на стадиях серийного производства и эксплуатации, разрабатывается программа поддержания надежности (ППН). ППН составляется и утверждается на стадиях «Изготовление установочной партии, головного образца» и «Изготовление и поставка серийных изделий». ППН ежегодно дополняется новыми мероприятиями, основанными на анализе результатов серийного производства и эксплуатации. В ППН включаются также долгосрочные мероприятия по дальнейшему повышению ресурса и сроков службы. При этом используется статистическая информация об отказах и неисправностях изделий, находящихся в эксплуатации.

Для конкретизации программы испытаний новых изделий может разрабатываться руководящий документ, называемый ПЭО (программа экспериментальной обработки) и определяющий цели, задачи, порядок проведения и необходимый объем экспериментальной отработки, а также порядок подтверждения основных эксплуатационных характеристик и надежности.

7. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

7.1. Экономическая эффективность повышения надежности машин при их производстве и эксплуатации

Критерий экономической оценки оборудования по уровню долговечности деталей – сумма приведенных затрат, учитывающая текущие и капитальные затраты на производство и использование машин.

Мероприятия по повышению долговечности делят условно на две группы.

Мероприятия I группы не оказывают существенного влияния на производительность машины и другие ее параметры.

Экономическая эффективность в данном случае:

$$\mathcal{E}_{г.р} = B_{г1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{i0} + Z_{i0}}{t_{i0}} - \frac{C_{i1} + Z_{i1}}{t_{i1}} \right),$$

где $\mathcal{E}_{г.р}$ – годовой экономический эффект от повышения долговечности деталей, у. е.; $B_{г1}$ – годовой выпуск новых машин, шт.; n – количество деталей, заменяемых на упрочненные; C_{i0} и C_{i1} – цены сопоставимых деталей, у. е.; Z_{i0} и Z_{i1} – зарплата рабочих по установке и периодической замене сравниваемых деталей, у. е.; t_{i0} и t_{i1} – сроки службы сопоставляемых деталей (кратные срокам службы машин), годы.

Мероприятия II группы вызывают повышение производительности машин. Учитывается уменьшение числа простоев, т. е. увеличивается коэффициент использования рабочего времени, вырастает наработка машин.

Экономическая эффективность:

$$\mathcal{E}_{г.э} = B_{г1} W_{г1} (I_0 - I_1),$$

где $B_{г1}$ – годовой выпуск машин, укомплектованных более долговечными деталями, шт.; $W_{г1}$ – годовая наработка более производительной машины, м³, т; I_0 и I_1 – приведенные затраты сопоставляемых новой и старой машин в расчете на единицу производительности, у. е.:

$$I_0 = I_0 + E_n K_{ц0}; \quad I_1 = I_1 + E_n K_{ц1},$$

где I_0 и I_1 – эксплуатационные издержки в расчете на единицу производительности, руб.; E_n – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; $K_{ц0}$ и $K_{ц1}$ – капитальные вложения на единицу производительности старой и новой машин, у. е.

7.2. Экономическая эффективность повышения надежности

При повышении износостойкости

$$\mathcal{E}_{г.э} = N_1 c_1 - N_2 c_2,$$

где $\mathcal{E}_{г.э}$ – годовой эффект от внедрения новой технологии восстановления деталей; N_1 и N_2 – количество деталей, которое необходимо восстановить при старой и соответственно при новой технологии:

$$N_2 = N_1 \frac{T_1}{T_2} = N_1 \eta_{и},$$

где T_1 и T_2 – технический ресурс детали, восстановленной по старой и соответственно по новой технологии; $\eta_{и}$ – коэффициент относительной износостойкости; c_1 и c_2 – себестоимость восстановления деталей при старой и соответственно при новой технологии.

Тогда

$$\mathcal{E}_{г.э} = N_1 (c_1 - \eta_{и} c_2).$$

Экономия от внедрения новой технологии, повышающей износостойкость деталей:

$$\mathcal{E}_{г.э} = N W_1 \frac{c_1 W_{p1} - c_2 W_{p2}}{W_{p1} \cdot W_{p2}},$$

где N – количество ремонтируемых объектов; W_1 – средняя плановая наработка на один объект; c_1 и c_2 – себестоимость ремонта объекта по старой и соответственно по новой технологии; W_{p1} и W_{p2} – среднегодовая наработка на один объект по старой и соответственно новой технологии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проектирование и расчет специальных лесных машин / М. И. Зайчик [и др.]. – М.: Лесная промышленность, 1976.
2. Жуков, А. В. Теория лесных машин / А. В. Жуков. – Минск: БГТУ, 2001.
3. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1999.
4. Острейковский, В. А. Теория надежности / В. А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2003.
5. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин / И. М. Жарский [и др.]. – Минск: Высшая школа, 2005.
6. Луканский, В. С. Долговечность деталей шасси автомобиля / В. С. Луканский, Ю. Г. Котиков, Е. И. Зайцев. – Л.: Машиностроение, 1984.
7. Гмурман, В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1999.
8. Решетов, Д. Н. Надежность машин / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев. – М.: Высшая школа, 1988.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Основные понятия, положения и определения.....	4
2. Статистическая оценка основных показателей надежности	13
2.1. Общие положения	13
2.2. Показатели безотказности.....	15
2.3. Показатели долговечности.....	22
2.4. Надежность и законы распределения случайных величин.....	24
3. Причины потери работоспособности и физическая сущность надежности лесотранспортных машин и оборудования	30
3.1. Причины потери работоспособности.....	30
3.2. Общие сведения о трении	31
3.3. Классификация видов трения и изнашивания	34
3.4. Закономерности изнашивания	42
3.5. Методы определения износа	43
3.6. Расчет деталей на износ.....	44
3.7. Определение износа машины	44
3.8. Разрушения и повреждения деталей и оборудования при отсутствии трения	45
4. Методы расчета лесных машин и оборудования на надежность. 47	47
4.1. Вероятность безотказной работы по заданному критерию	47
4.2. Расчет по критерию прочности	47
4.3. Вероятность безотказной работы по критерию прочности	51
4.4. Теория подобия усталостного разрушения	52
4.5. Вероятность безотказной работы машин при различных видах соединения ее элементов.....	53
4.6. Предельные состояния деталей, сопряжений и узлов машин по износу	56
4.7. Оптимальная долговечность	57
5. Методы испытаний машин и оборудования на надежность.....	59
5.1. Классификация методов испытаний	59
5.2. Планирование объема испытаний	61
5.3. Ускоренные испытания на надежность	63
5.4. Техническая диагностика машин	64

6. Основные направления повышения надежности лесных машин и оборудования.....	66
6.1. Общие направления повышения надежности	66
6.2. Особенности обеспечения надежности лесопромышленного оборудования	66
6.3. Мероприятия по обеспечению надежности	69
6.4. Разработка программы обеспечения надежности (ПОН)	71
7. Экономическая эффективность повышения надежности машин	75
7.1. Экономическая эффективность повышения надежности машин при их производстве и эксплуатации	75
7.2. Экономическая эффективность повышения надежности	76
Список использованных источников	77

Учебное издание

Лой Владимир Николаевич
Гороновский Андрей Романович
Мохов Сергей Петрович
Коробкин Владимир Андреевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ
МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ**

Тексты лекций

Редактор *О. П. Соломевич*
Компьютерная верстка *О. П. Соломевич*

Подписано в печать 10.12.2010. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 4,7. Уч.-изд. л. 4,8.
Тираж 100 экз. Заказ .

Отпечатано в Центре издательско-полиграфических
и информационных технологий учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220006. Минск, Свердлова, 13а.
ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.
ЛП № 02330/0150477 от 16.01.2009.